

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Διερεύνηση φυσικοχημικών παραμέτρων ιχθυοκαλλιεργειών με τη
χρήση δορυφορικών δεδομένων SENTINEL»**

Σταυρούλα Διαμάντη

ΒΟΛΟΣ 2019

**UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF AGRICULTURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF ICHTHYOLOGY AND AQUATIC
ENVIRONMENT**

POSTGRADUATE MASTER'S THESIS

**«Investigation of physicochemical parameters for aquaculture using
SENTINEL satellite data»**

Stavroula Diamanti

VOLOS 2019

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Νικόλαος Νεοφύτου, Επίκουρος Καθηγητής, Υδατοκαλλιέργειες και Περιβάλλον, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπων**,

2) Παναγιώτα Παναγιωτάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Υδατοκαλλιέργειες, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**,

3) Χρήστος Δομενικιώτης, ΕΔΙΠ, Τηλεπισκόπηση και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στο να φέρω εις πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της εργασίας αυτής, Επικ. Καθηγητή κ. Νίκο Νεοφύτου για την πολύτιμη βοήθειά του και για τις χρήσιμες συμβουλές του, τον κ. Χ. Δομενικιώτη (ΕΔΙΠ) για την καθοδήγησή του καθ' όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της διατριβής, καθώς και τη διαρκή υποστήριξή του κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας, καθώς και το μέλος της εξεταστικής επιτροπής μου την Αναπλ. Καθηγήτρια κα Π. Παναγιωτάκη.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου και στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΕΣ ΣΕΛΙΔΕΣ	i-iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Υδατοκαλλιέργειες και περιβάλλον	3
1.2 Τηλεπισκόπηση.....	5
1.3 Χαρακτηριστικά δορυφόρων.....	7
1.3.1 Διακριτικές ικανότητες δορυφορικών δεδομένων.....	9
1.3.1.1 Χωρική διακριτική ικανότητα	9
1.3.1.2 Χρονική διακριτική ικανότητα	10
1.3.1.3 Φασματική διακριτική ικανότητα.....	13
1.3.1.4 Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα	13
1.4 Φασματικά Κανάλια	14
1.5 Ατμοσφαιρικές διορθώσεις.....	15
1.6 Τηλεπισκόπηση Ποιότητας Υδάτων	18
1.7 Σκοπός της έρευνας	26
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	28
2.1 Περιοχές μελέτης.....	28
2.2 Δορυφορικά δεδομένα	30
2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα	31
2.4 Ανάκτηση και Επιλογή δεδομένων	31
2.5 Προεπεξεργασία δεδομένων- Ατμοσφαιρικές διορθώσεις	36
2.6 Φασματικές υπογραφές	37
2.7 Συσχέτιση μετρήσεων	38
2.8 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων.....	40
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	41
3.1 Δορυφορικές μετρήσεις και μετρήσεις δειγματοληψίας	41
3.2 Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας	41
3.3 Συσχετίσεις και των δύο μετρήσεων	53
3.4 Συσχετίσεις των σημείων που δε βρίσκονται κοντά σε κλωβούς.....	55
3.5 Συσχέτιση ανακλάσεων με μετρήσεις των θρεπτικών	57
3.6 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων συσχέτισης θρεπτικών αλάτων με δορυφορικά δεδομένα.....	65
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	91
4.1 Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας	92

4.2 Συντελεστής συσχέτισης και γραμμές παλινδρόμησης	93
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100
ABSTRACT	107

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η εκτίμηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του, σε περιοχές που δραστηριοποιούνται ιχθυοκαλλιέργειες, πραγματοποιείται με επί τόπου δειγματοληψίες που είναι χρονοβόρες και με αυξημένο κόστος, ειδικά όταν πρέπει να υπάρξουν πολλές επαναλήψεις. Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης μπορεί να συμβάλει στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος και την ποσοτική εκτίμηση παραμέτρων του. Ολοκληρωμένες προσεγγίσεις οι οποίες είναι βασισμένες στην ανάκτηση των δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή διαγνωστικών συστημάτων και προγνωστικών μοντέλων, έχουν επεκτείνει τη δυναμική της τηλεπισκόπησης. Σε επιχειρησιακό επίπεδο η τηλεπισκόπηση μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη στην παρακολούθηση των παράκτιων περιοχών όπου υπάρχουν ιχθυοκαλλιέργειες, χωρίς όμως ακόμα να έχει αντικαταστήσει τις επίγειες μετρήσεις. Στοιχεία που σχετίζονται με την επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε ιχθυοκαλλιεργητικές μονάδες είναι ο ευτροφισμός, οι οργανικοί και ανόργανοι ρύποι, το μικροβιακό φορτίο και η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, τα οποία είναι δύσκολο να μετρηθούν άμεσα από τα δορυφορικά δεδομένα, αλλά συνήθως εκτιμούνται μέσω της συσχέτισης των παραμέτρων αυτών με τεχνικές που σχετίζονται με το χρώμα των θαλασσών και την ανάπτυξη αντίστοιχων μοντέλων.

Κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από το δορυφόρο Sentinel-2^A, για την εξαγωγή φασματικών υπογραφών και τη συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων με τις μετρήσεις των θρεπτικών αλάτων που συλλέχθηκαν από επίγειες μετρήσεις, καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης συγκέντρωσης θρεπτικών αλάτων σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιεργητικής μονάδας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι περισσότερες παράμετροι που μελετήθηκαν παρουσίασαν αρκετά υψηλές συσχετίσεις στις φασματικές περιοχές κυρίως του κοντινού υπέρυθρου φάσματος. Συμπερασματικά, με τις δορυφορικές εικόνες του Sentinel-2 είναι εφικτή η ανάπτυξη μοντέλων ποσοτικού προσδιορισμού των θρεπτικών συστατικών, σε περιβάλλον ιχθυοκαλλιέργειών, που μπορεί να οδηγήσει στην επιχειρησιακή παρακολούθησή του.

Λέξεις κλειδιά: Ιχθυοκαλλιέργεια, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, θρεπτικά άλατα, Πρόγραμμα Copernicus, Δορυφόρος Sentinel-2, Λογισμικό QGIS.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υδατοκαλλιέργειες και περιβάλλον

Ένα μεγάλο ποσοστό των ψαριών προέρχεται από την παραγωγή των ιχθυοκαλλιεργειών και αναμένεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες, με σκοπό να καλυφθούν οι διατροφικές ανάγκες του πλανήτη (Duarte *et al.* 2009). Παγκοσμίως, από το 1961 έως και το 2016, η μέση ετήσια αύξηση κατανάλωσης ψαριών αυξήθηκε από τα 9,0 στα 20,2 κιλά, καθώς και για τα έτη 2016 και 2017 δείχνουν περαιτέρω ανάπτυξη περίπου 20,3 και 20,5 κιλά, αντίστοιχα (FAO 2018). Τα φυσικά αποθέματα των ιχθύων έχουν μειωθεί δραματικά εξαιτίας της υπεραλίευσης. Ο κλάδος των υδατοκαλλιεργειών είναι διαρκώς αναπτυσσόμενος και έχει ως στόχο την κάλυψη ζήτησης της αγοράς με αλιευτικούς πόρους. Από τα τέλη του 1980, η υδατοκαλλιέργεια παρουσίασε μεγάλη αύξηση στην παραγωγή ιχθύων, καθώς το 1974 κάλυψε μόλις το 7% της ζήτησης για κατανάλωση, το ποσοστό αυτό αυξήθηκε σε 26% το 1994, 39% το 2004 και το 50% το 2015. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την ανάπτυξη είχε η Κίνα, με ποσοστό παραγωγής περισσότερο από το 60% της παγκόσμιας παραγωγής υδατοκαλλιέργειας (FAO 2016). Η παγκόσμια παραγωγή ιχθύων το 2016, ανήλθε περίπου στα 171 εκατομμύρια τόνους. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2030 θα χρειαστούν επιπλέον 27 εκατομμύρια τόνοι αλιευτικών προϊόντων για να ικανοποιηθεί η αυξανόμενη ζήτηση ιχθύων (FAO 2018).

Οι χώρες με τα μεγαλύτερα ποσοστά παραγωγής ιχθύων στην Ευρώπη είναι η Ισπανία, η Γαλλία, η Ιταλία και η Ελλάδα. Σύμφωνα με στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Τροφίμων (FAO), ο όγκος της παραγωγής των εκτρεφόμενων ειδών στην Ευρώπη το 2016 ήταν 1,29 εκατομμύρια τόνοι, αξίας 3,73 δισεκατομμύρια ευρώ. Ο παραγόμενος όγκος ιχθύων από τις ιχθυοκαλλιέργειες σε όλη την Ευρώπη ανέρχεται στο 53,3%, δηλαδή περίπου 688.924 τόνοι (ΣΕΘ 2018).

Στην Ελλάδα η ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας ξεκίνησε από το 1951 με την εκκόλαψη αυγών της ιριδίζουσας πέστροφας (*Oncorhynchus mykiss*). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εκτατική μέθοδος παραγωγής, στη συνέχεια η ημιεντατική και τελικά η εντατική, δίνοντας αποτελέσματα μεγάλης παραγωγής ψαριών, κατέχοντας μια από τις πρώτες θέσεις στη Μεσόγειο Θάλασσα. Η Ελλάδα αντιπροσωπεύει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό παραγωγής σε τσιπούρα και λαβράκι, που αγγίζει σχεδόν το 62% της συνολικής παραγωγής της Ευρώπης (ΣΕΘ 2018). Αυτό οφείλεται τόσο στις ιδανικές κλιματολογικές συνθήκες, όσο στα πολύ καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού για την ανάπτυξη των υδατοκαλλιεργειών, που εμφανίζονται στα 16.500 km ακτών που διαθέτει η Ελλάδα (Κλαουδάτος & Κλαουδάτος 2010).

Θεωρείται επίσης, ότι η υδατοκαλλιέργεια συμβάλλει στην παγκόσμια ανάπτυξη παραγωγής τροφίμων, στο εθνικό και παγκόσμιο ακαθάριστο εγχώριο προϊόν και δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας (Hishamunda *et al.* 2010).

Παρότι όμως η ανάπτυξη της ιχθυοκαλλιέργειας δημιουργεί θέσεις εργασίας και τονώνει την οικονομία, ορισμένοι αντιδρούν σε αυτές, γιατί θεωρούν ότι η δραστηριότητα αυτή αποτελεί παράγοντα υποβάθμισης του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Michler-Cieluch & Kodeih 2008).

Η εντατική εκτροφή σε πλωτούς ιχθυοκλωβούς είναι πιθανό να προκαλεί επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον, επειδή δεν είναι δυνατή η εφαρμογή κάποιας επεξεργασίας των όποιων αποβλήτων της (Κλαουδάτος & Χατζηστεφάνου 1996). Οι ιχθυοκαλλιέργειες απελευθερώνουν απόβλητα στο θαλάσσιο περιβάλλον πλούσια σε άζωτο και φώσφορο σε διαλυμένη μορφή (La Rosa *et al.* 2002). Στα υδάτινα οικοσυστήματα για παράδειγμα το άζωτο, μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες μορφές, όπως NH_3 , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , το ελεύθερο αέριο (N_2) και τις οργανικές ενώσεις όπως τα

αμινοξέα και οι πρωτεΐνες (Κλαουδάτος & Κλαουδάτος 2010). Σε περιπτώσεις όπου οι ποσότητες θρεπτικών που παράγονται από τις ιχθυοκαλλιέργειες ξεπερνούν τη φέρουσα ικανότητα (carrying capacity) του οικοσυστήματος, μπορεί να προκαλέσουν σε συνθήκες ευτροφισμού (La Rosa *et al.* 2002). Ορισμένες από τις μεταβλητές που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού είναι τα αμμωνιακά (NH_4), τα νιτρώδη (NO_2), τα νιτρικά (NO_3), τα φωσφορικά (PO_4) και τα πυριτικά (SiO_2).

Η συνεχής παρακολούθηση του περιβάλλοντος είναι μια απαραίτητη διαδικασία που πρέπει να πραγματοποιείται, ειδικότερα σε περιοχές με ιχθυοκαλλιεργητικές δραστηριότητες. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται μετρήσεις έτσι ώστε να υπολογισθεί το ποσοστό επίδρασης των ιχθυοκαλλιεργειών στο υδάτινο περιβάλλον, κυρίως στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλάτων, η αύξηση των οποίων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευτροφισμού στην εγγύς περιοχή εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών.

1.2 Τηλεπισκόπηση

Στην προσπάθεια να ικανοποιηθούν οι αυξημένες ανάγκες για λεπτομερή και άμεση απόκτηση δεδομένων και πληροφοριών, που σχετίζονται με τα περιβαλλοντικά δεδομένα, αναπτύχθηκε η επιστήμη της τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την χαρτογράφηση και τη μελέτη του χερσαίου, του υδάτινου και του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, του χωροταξικού σχεδιασμού και την εκτίμηση ορισμένων παραμέτρων ποιότητας νερού (Wang *et al.* 2007). Με τη χρήση των δορυφορικών εικόνων, δίνεται η δυνατότητα μελέτης μεγάλων εκτάσεων σε ξηρά και θάλασσα, ακόμα και σε περιοχές που η πρόσβαση είναι αρκετά δύσκολη ή ακόμη και

αδύνατη (Καρτάλης & Φειδάς 2015). Στην ανάπτυξη της τηλεπισκόπησης συνετέλεσαν πολλές και διαφορετικές επιστήμες, μεταξύ των οποίων η τοπογραφία, τα μαθηματικά, η φυσική και η πληροφορική. Εφαρμόζεται σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως π.χ. θετικές επιστήμες, τοπογραφία, γεωπονία, γεωλογία, χωροταξία, πολεοδομία, μετεωρολογία, ωκεανογραφία, αρχαιολογία, συγκοινωνιολογία, περιβαλλοντικές επιστήμες, όπως ακόμη και σε στρατιωτικές εφαρμογές (Περάκης και συν. 2015).

Η χρήση των συστημάτων της τηλεπισκόπησης και η επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων επιτρέπει σχεδόν τη συνεχή χωρική κάλυψη (έως και πλανητική- κάλυψη). Μέσω της τηλεπισκόπησης μας δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης και εκτίμησης παραμέτρων εσωτερικών και παράκτιων υδάτων. Επίσης, σημαντικό είναι το γεγονός ότι, για κάθε εποχή, υπάρχουν διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα με σχετικά χαμηλό κόστος και υψηλή ανάλυση, καθώς και σημαντική μείωση του κόστους και του χρόνου των δειγματοληψιών (Akbar *et al.* 2010). Τέλος, είναι βασισμένη στην ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων αλλά και επίγειων μετρήσεων, οι οποίες παρέχουν δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο. Δεδομένα τα οποία μας δίνουν τη δυνατότητα να κατανοήσουμε και να διαχειριστούμε βιώσιμα το περιβάλλον από τοπικό έως παγκόσμιο επίπεδο (Περάκης και συν. 2015).

Η τηλεπισκόπηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, βασίζεται στον τρόπο που μπορούν να ανιχνευθούν μετρήσιμες μεταβολές στο χρώμα των υδάτων, που προκαλούνται από μεταβολές στις συγκεντρώσεις βασικών συστατικών του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δορυφόρο ή αεροσκάφος. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη παρακολούθησης της ποιότητας του υδάτινου περιβάλλοντος, η οποία περιλαμβάνει παρατηρήσεις για την καθαρότητα του νερού, τη διαπερατότητα, τη θολερότητα, το

βάθος, τη βιομάζα του φυτοπλαγκτού (χλωροφύλλη-α), τα φύκη, τα θρεπτικά άλατα, το διαλυμένο οξυγόνο, τους οργανικούς και ανόργανους ρύπους, και τέλος το μικροβιακό φορτίο. Η επίδραση ορισμένων παραμέτρων είναι πολύ διαφορετική στο χρώμα των υδάτων. Η ικανότητά τους να απορροφούν ή να ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, είναι εκείνη που καθιστά μετρήσιμη την επίδραση των παραμέτρων στο χρώμα των υδάτων. Επιπλέον, μερικές από αυτές τις παραμέτρους δεν είναι άμεσα μετρήσιμες από το διάστημα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η τηλεπισκόπηση του χρώματος των θαλασσών (ocean colour) και ο συνδυασμός των δορυφορικών δεδομένων με επίγειες μετρήσεις (Παρχαρίδης 2015).

Ιστορικά, για να γίνουν οι εργαστηριακές αναλύσεις πραγματοποιείται συλλογή δειγμάτων και επιτόπιες μετρήσεις, τα οποία αποτελούν τα συμβατικά πρωτόκολλα παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να παρέχονται ακριβείς πληροφορίες, όμως η διαδικασία αυτή είναι συχνά απαγορευτικά δαπανηρή λόγω της συχνότητας και της γεωγραφικής κάλυψης που απαιτείται. Οι βελτιωμένες τεχνολογίες αισθητήρων, η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων, οι ικανότητες επεξεργασίας εικόνας, οι σημαντικές βελτιώσεις στη διαθεσιμότητα των δεδομένων και η εύκολη διάδοσή τους, έχουν οδηγήσει σε σημαντικές εξελίξεις την επιστήμη της τηλεπισκόπησης των παράκτιων και εσωτερικών υδάτων.

1.3 Χαρακτηριστικά δορυφόρων

Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση διαθέτουν ένα μεγάλο εύρος χωρικών, χρονικών και φασματικών διακριτικών ικανοτήτων, τα οποία εξαρτώνται από τις προδιαγραφές του κάθε αισθητήρα και την δορυφορική τροχιά του εκάστοτε δορυφόρου. Οι δυνατότητες των αισθητήρων και της τροχιάς του κάθε

δορυφόρου, δημιουργούν κάποιους περιορισμούς μεταξύ των χωρικών, των χρονικών και των φασματικών διακριτικών ικανοτήτων που είναι διαθέσιμες από τις δορυφορικές αποστολές. Τέτοιου είδους περιορισμοί με το πέρασ του χρόνου μειώνονται λόγω της προόδου της σύγχρονης τεχνολογίας αισθητήρων. Ωστόσο, οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης υποστηρίζονται και από εναλλακτικές μεθόδους. Κάποιες από αυτές είναι η λήψη δεδομένων με εναλλακτικές πλατφόρμες όπως αεροσκάφη ή, πιο πρόσφατα, τηλεκατευθυνόμενες κατασκευές (drones) που παρέχουν επιπλέον λύσεις για στοχοθετημένες παρατηρήσεις υψηλής ευκρίνειας. Αν και χρησιμοποιούνται συχνά για έρευνα ή για σκοπούς επίδειξης, η αερομεταφερόμενη τηλεπισκόπηση είναι συχνά απαγορευτικά δαπανηρή για επιχειρησιακή χρήση της παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων (Greb *et al.* 2018).

Πιο συγκεκριμένα η αποστολή του δορυφόρου Sentinel-2, αποτελείται από τους Sentinel-2^A και τον διάδοχό του Sentinel-2^B. Ουσιαστικά η συνύπαρξη και των δύο δορυφόρων καθιστά δυνατή την κάλυψη όλης της γήινης επιφάνειας, σε χρονικό διάστημα διέλευσης από το ίδιο σημείο μια με δύο ημέρες. Κάθε ένας από τους δορυφόρους αυτούς ζυγίζει 1140 Kg. Έχουν σχεδιαστεί για να έχουν διάρκεια λειτουργίας 7 έτη και με προοπτικές για ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια (<https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

Λόγω της επικάλυψης των δορυφορικών δεδομένων τους με τον δορυφόρο Landsat8, η NASA και η ESA κατόπιν συνεννόησης, οδήγησαν τους δύο δορυφόρους σε επαναδιέλευση από τον Ισημερινό κάθε 3 ημέρες. Οι δορυφόροι Sentinel-2 είναι προϊόντα συνεργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Διαστήματος (European Space Agency–ESA), μιας κοινοπραξίας 60 εταιρειών με επικεφαλής την Airbus Defense and Space και υποστηρίζονται από το Εθνικό Κέντρο Διαστημικών Μελετών (Centre

Nationald' tudes Spatiales–CNES) της Γαλλίας και το Γερμανικό κέντρο Διαστημικής DLR. Οι δορυφόροι αυτοί θεωρούνται κατάλληλοι για την παρακολούθηση και διαχείριση του περιβάλλοντος, για τη μελέτη των υδάτων και των υδρογραφικών δικτύων, την κάλυψη των εδαφών και τη βλάστηση σε παράκτιες περιοχές. Παρέχουν δεδομένα για τη διαχείριση των αλλαγών των χρήσεων γης, την καταγραφή δασικών περιοχών και δασικών καταστροφών, τη διαχείριση και καταγραφή ανάπτυξης φυτικών πληθυσμών, την καταγραφή της ρύπανσης παράκτιων και λιμναίων περιοχών και τέλος την καταγραφή και παρακολούθηση φυσικών καταστροφών όπως πλημμυρών, ηφαιστειακών εκρήξεων και καθιζήσεων-ολισθήσεων εδαφών. Γενικότερα, με τα δεδομένα των αισθητήρων δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν και να εκτιμηθούν παράγοντες πολύ σημαντικοί για την ανθρώπινη διαβίωση και επιβίωση (*User Guides Spatial Resolution 2018*, <https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).

1.3.1 Διακριτικές ικανότητες δορυφορικών δεδομένων

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των δορυφορικών εικόνων είναι η διακριτική ικανότητα, η οποία λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή των δορυφορικών δεδομένων.

1.3.1.1 Χωρική διακριτική ικανότητα

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων τα οποία φαίνονται καθαρά και καταγράφονται σε μια εικόνα λέγεται χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution) (Astaras 1994). Η χωρική διακριτική ικανότητα του δορυφόρου καθορίζει το μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού που μπορεί να ανιχνευθεί. Πιο συγκεκριμένα, είναι η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να απέχουν δύο στοιχεία στην εικόνα, με σκοπό να

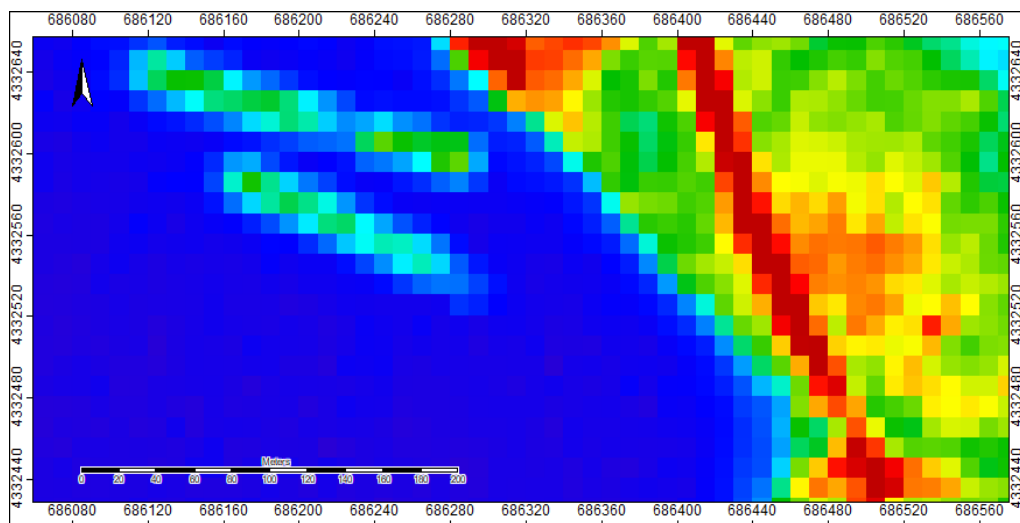
διακρίνονται μεταξύ τους, να αναγνωρίζεται το ελάχιστο μέγεθος ενός αντικειμένου, έτσι ώστε να είναι διακριτό στην εικόνα (Καρτάλης & Φειδάς 2015). Δηλαδή, εάν η χωρική διακριτική ικανότητα είναι 20 m, τότε στην ληφθείσα εικόνα κάθε εικονοστοιχείο (pixel) προσδιορίζει μία περιοχή της επιφάνειας με έκταση 20 X 20 m. Επίσης, εξαρτάται από την αντίθεση της φωτεινότητας (contrast) των αντικειμένων που εμπεριέχονται σε μια εικόνα (Περάκης 2015). Ως αντίθεση της φωτεινότητας ορίζεται η διαφοροποίηση στη φωτεινότητα, μεταξύ ενός αντικειμένου και των υπολοίπων που βρίσκονται γύρω του (Campbell 2013). Η αντίθεση (contrast) εξαρτάται από:

- το σχήμα των αντικειμένων ή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους
- τον λόγο του προσανατολισμού (όψη-aspectratio) του μήκους σε σχέση με το πλάτος
- τον αριθμό των αντικειμένων σε μια περιοχή
- το εύρος που εκτείνεται και την ομοιομορφία του γύρω χώρου (Καρτάλης & Φειδάς 2015).

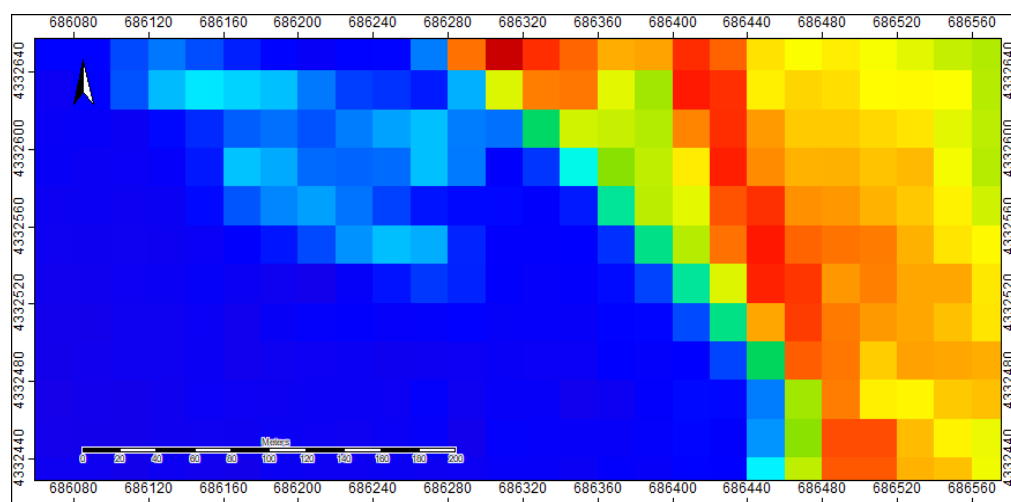
Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η διαφορά της χωρικής διακριτικής ικανότητας της ίδιας περιοχής με το κανάλι 4 και το κανάλι 5, που έχουν χωρικές διακριτικές ικανότητες 10 m και 20 m, αντίστοιχα.

1.3.1.2 Χρονική διακριτική ικανότητα

Η συχνότητα με την οποία γίνεται η λήψη των εικόνων σε μια περιοχή σχετίζεται με τη χρονική διακριτική ικανότητα (temporal resolution) του κάθε δορυφόρου. Η περίοδος επαναληψιμότητας σε ένα δορυφορικό σύστημα είναι συνήθως μεταξύ κάποιων ημερών ή ωρών όταν πρόκειται για αστερισμό δορυφορικού συστήματος.



(α)



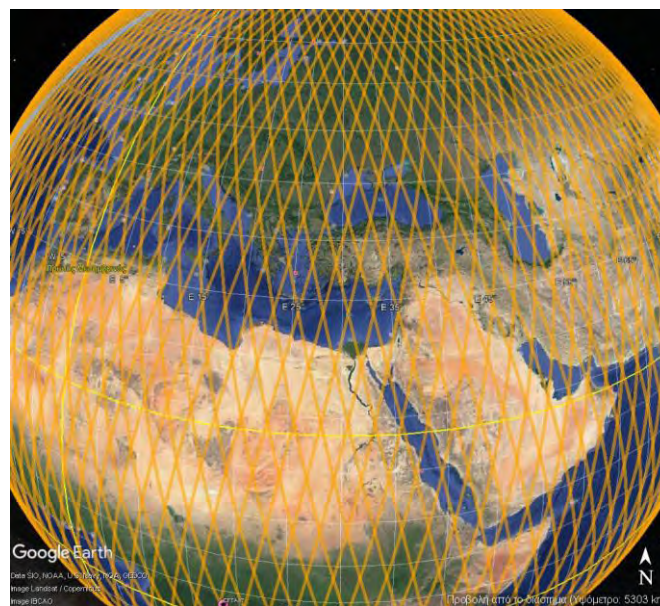
(β)

Εικόνα 1.1 : Δορυφορικές εικόνες SENTINEL 2 της 30^{ης} Ιουλίου 2016, από την ιχθυοκαλλιεργητική μονάδα της Μηλίνας, χωρική διακριτική ικανότητα 10 m (α), χωρική διακριτική ικανότητα 20 m (β).

Για να πραγματοποιείται η διαχρονική ανάλυση και για να υπάρχουν αξιόπιστα αποτελέσματα, θα πρέπει οι διαχρονικές εικόνες να λαμβάνονται από τα συστήματα καταγραφής την ίδια περίπου ώρα της ημέρας. Αυτό έχει ως σκοπό την εξάλειψη των ημερήσιων διαφορών της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, διότι προκαλούν ανώμαλες διαφοροποιήσεις των ιδιοτήτων ανάκλασης των αντικειμένων.

Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται την ίδια περίοδο του έτους, έτσι ώστε να μειώνονται οι φαινολογικές διαφοροποιήσεις των επιφανειακών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, ορισμένα δορυφορικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν την ίδια περιοχή ενώ βρίσκονται στην επόμενη ή τη μεθεπόμενη τροχιά. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του δορυφόρου που έχει τη δυνατότητα να στρέφεται ο σαρωτής υπό γωνία. Επομένως, η χρονική διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τις δυνατότητες του κάθε συστήματος, την επικάλυψη και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής.

Οι δυο δορυφόροι που χρησιμοποιήθηκαν, είναι προγραμματισμένοι να πραγματοποιούν επαναδιέλευση από τον Ισημερινό σε διάρκεια 3 ημερών, δηλαδή οι δυο δορυφόροι έχουν πρόσβαση σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη μέσα σε μια έως δυο μέρες. Στην Εικόνα 1.2 φαίνονται οι τροχιές του δορυφόρου Sentinel-2.



Εικόνα 1.2 : Οι 143 τροχιές των δορυφόρων SENTINEL-2A και SENTINEL-2B που βρίσκονται στην ίδια τροχιά αλλά με διαφορά 180° . Περιστρέφονται γύρω από τη γη σε ηλιοσύγχρονη τροχιά στα 786 km με κλίση 98.62° και με μέση τοπική ώρα 10:30 π.μ.. Οι ώρες λήψης είναι παρόμοιες με αυτές των LANDSAT και SPOT-5, για να εξασφαλιστεί η συνέχεια των δορυφορικών δεδομένων (πηγή ESA και προβολή μέσω Google Earth, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description/orbit>).

1.3.1.3 Φασματική διακριτική ικανότητα

Η Φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution) σχετίζεται με τον αριθμό των φασματικών καναλιών που χρησιμοποιεί ο κάθε δορυφόρος. Στις πολυφασματικές εικόνες το είδος λήψης των εικόνων σχετίζεται με τον αριθμό και το εύρος των φασματικών καναλιών. Η χρήση τους μπορεί να επιφέρει πολύ καλά αποτελέσματα διακριτικής ικανότητας σε σχέση με οποιοδήποτε μεμονωμένο φασματικό κανάλι.

Η αύξηση της φασματικής ανάλυσης επιδρά αρνητικά στην ποιότητα των παραγόμενων εικόνων. Δηλαδή η φασματική διακριτική ικανότητα σε ένα κανάλι και το εύρος της φασματικής περιοχής της ακτινοβολίας που καταγράφεται στο κανάλι αυτό, είναι αντιστρόφως ανάλογα (Καρτάλης & Φείδας 2015). Γενικά, οι φασματικές ζώνες του ορατού μήκος κύματος είναι οι εξής: μπλε: 0,40 - 0,50 μm , πράσινο: 0,50 - 0,60 μm , κόκκινο: 0,60 - 0,70 μm , κοντινό υπέρυθρο: 0,70 - 0,90 μm και θερμικό υπέρυθρο: 8,0 - 14,05 μm (Περάκης και συν. 2015).

1.3.1.4 Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα

Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (radiometric resolution) είναι η ικανότητα του οργάνου να διακρίνει τις διαφορές στην ένταση του φωτός ή την ανάκλαση και να καταγράφει τις υπάρχουσες διαφορές στην ισχύ του σήματος. Τα δεδομένα μιας εικόνας αντιπροσωπεύονται από ψηφιακές τιμές που μεταβάλλονται από 0 έως μία τιμή X. Η αύξηση της ραδιομετρικής ικανότητας μεταβάλλει ανάλογα τις διαβαθμίσεις του χρώματος του γκρι στην εικόνα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα των στόχων.

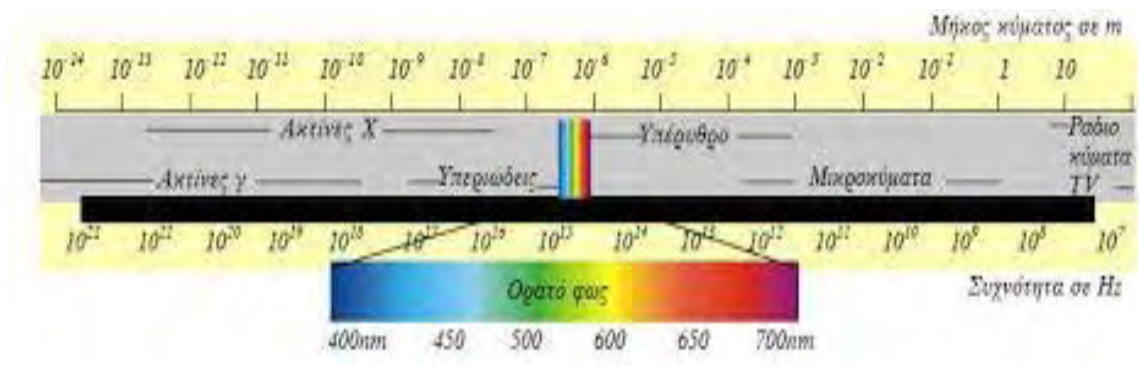
Για παράδειγμα, στη ραδιομετρική ικανότητα παρατηρείται βελτίωση με τη χρήση 256 διαβαθμίσεων του γκρι (8 bits) σε σύγκριση με τη χρήση 64 (6 bits)

(Καρτάλης & Φειδάς 2015). Η ραδιομετρική ανάλυση του οργάνου MSI είναι 12 bit, επιτρέποντας την απόκτηση της εικόνας σε μια περιοχή 0 έως 4095 δυνητικών τιμών έντασης φωτός (User Guides SENTINEL 2, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>).

1.4 Φασματικά Κανάλια

Στο ορατό φάσμα συναντάμε τα φασματικά κανάλια 2, 3 και 4 τα οποία είναι το μπλε, το πράσινο και το κόκκινο χρώμα. Στο κοντινό υπέρυθρο, τα κανάλια 5, 6 και 7 καλύπτουν διαφορετικά τμήματα του υπέρυθρου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τον διαχωρισμό υγρού και ξηρού εδάφους και για τη γεωλογία. Πιο συγκεκριμένα διάφορα πετρώματα και εδάφη έχουν ισχυρές αντιθέσεις στο κοντινό υπέρυθρο, τα οποία σε άλλα φασματικά κανάλια φαίνονται παρόμοια. Το φασματικό κανάλι 8 είναι το παγχρωματικό κανάλι. Λειτουργεί όπως το ασπρόμαυρο φιλμ. Συνδυάζει τα ορατά χρώματα σε ένα κανάλι.

Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το συλλέγουν ελάχιστα διαστημικά όργανα καταγραφής, επειδή η ατμόσφαιρα το απορροφάει σχεδόν όλο. Τέλος, τα φασματικά κανάλια 11 και 12 βρίσκονται στο θερμικό υπέρυθρο και καταγράφουν τη θερμότητα. Αντιθέτως από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που καταγράφουν τη θερμοκρασία του αέρα, τα συγκεκριμένα φασματικά κανάλια καταγράφουν τη θερμοκρασία του εδάφους, το οποίο είναι συνήθως αρκετά θερμότερο (Εικ. 1.3).



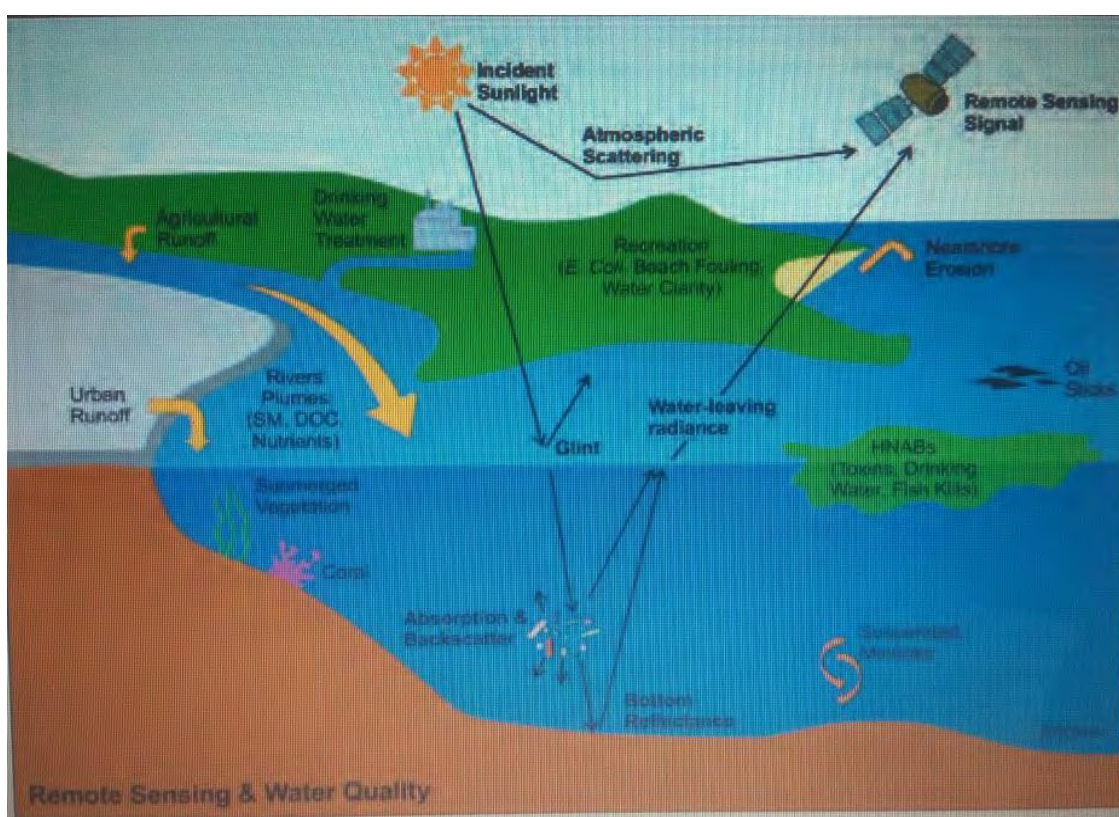
Εικόνα 1.3: Οι περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ebooks.edu.gr).

1.5 Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Η τιμή της ακτινοβολίας που ανακλούν τα στοιχεία μιας επιφάνειας δεν καταγράφονται με ακρίβεια από τους δορυφορικούς αισθητήρες. Οι μεταβολές στις συνθήκες φωτισμού, η ατμοσφαιρική απορρόφηση - σκέδαση της διαδιδόμενης ακτινοβολίας, καθώς και σφάλματα στην απόκριση του ανιχνευτή, μπορεί να μεταβάλουν τη ραδιομετρική τιμή ενός εικονοστοιχείου. Για τον λόγο αυτό γίνονται οι ραδιομετρικές διορθώσεις, οι οποίες μπορεί να αφορούν σε σφάλματα απόκρισης του ανιχνευτή, τη διόρθωση της επίδρασης της ηλιακής γωνίας και της τοπογραφίας, τη διόρθωση της ατμοσφαιρικής σκέδασης και τέλος, τη διόρθωση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης (Καρτάλης & Φείδας 2015).

Το κύριο μέρος ενός αισθητήρα καταγραφής υδάτινου χρώματος, είναι η ατμοσφαιρική ακτινοβολία σε ένα πλήθος διακριτών μηκών κύματος. Αυτά τα μήκη κύματος είναι το ορατό, το κοντινό υπέρυθρο και το μέσο υπέρυθρο. Η ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται από την επιφάνεια του νερού (Εικ. 1.4), ωστόσο ένα μεγάλο μέρος της αντανακλάται και διαχέεται από τα μόρια του αέρα και τα αερολύματα στην ατμόσφαιρα. Η ραδιομετρική τιμή ενός εικονοστοιχείου μπορεί να μεταβληθεί από σφάλματα του ανιχνευτή, από την απορρόφηση και τη σκέδαση της ηλιακής

ακτινοβολίας, καθώς και από τις μεταβολές στις συνθήκες φωτισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μας επιτρέπεται η μέγιστη δυνατή ανάκτηση των δεδομένων αντανάκλασης των υδάτων, εφόσον μηδενίσουμε ή ελαχιστοποιήσουμε τις παραμέτρους αυτές (Greb *et al.* 2018). Τέλος, επειδή αυτά τα σφάλματα δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, γίνονται ραδιομετρικές διορθώσεις οι οποίες βασίζονται σε μοντέλα (Καρτάλης & Φειδάς 2015).



Εικόνα 1.4: Σχηματική περιγραφή των βασικών παραμέτρων της ποιότητας των υδάτων σε παράκτια και εσωτερικά υδάτινα συστήματα, σε σχέση με την αντανάκλασή τους στην δορυφορική τηλεπισκόπηση (Greb *et al.* 2018).

Οι πρωτογενείς οπτικές παράμετροι που συναντάμε είναι η ακτινοβολία και η αντανάκλαση του νερού καθώς και της ατμόσφαιρας. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται, απαιτείται να λαμβάνεται στην τηλεπισκόπηση με επαρκή ακρίβεια ώστε να

ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα στα δεδομένα. Επίσης, η απορρόφηση και η σκέδαση είναι ένας βασικός παράγοντας σε πολλές αναλυτικές μεθόδους για την εξαγωγή δεδομένων της ποιότητας των υδάτων (IOCCG 2006).

Κατά συνέπεια, το μεγάλο ποσοστό παρεμβολής που παρατηρείται στην ατμοσφαιρική ακτινοβολία και ανακτάται από έναν δορυφορικό αισθητήρα, καθιστά τα δεδομένα ασαφή. Για τον λόγο αυτό θα ήταν απαραίτητο να γίνουν αλγοριθμικές διορθώσεις. Συνεπώς, η ατμοσφαιρική διόρθωση αποτελεί ένα πρωταρχικό βήμα στην επεξεργασία δορυφορικών εικόνων για τις περισσότερες εφαρμογές της ποιότητας του νερού (Greb *et al.* 2018).

Οι αλγόριθμοι ανάκτησης προσαρμόζονται αναλόγως με τις αναμενόμενες μεταβολές στο φασματικό κανάλι ή το μέγεθος της ακτινοβολίας που ανακλάται από το σήμα των υδάτων που μελετάμε σε σχέση με τις παραμέτρους ποιότητας αυτών. Οι αλγόριθμοι συχνά χωρίζονται σε εμπειρικούς με γνώμονα τα δεδομένα και σε ημι-αναλυτικούς με βάση τη φυσική. Εμπειρικοί αλγόριθμοι μπορεί έχουν μια βιο-οπτική βάση, όπως ο λόγος μπλε προς πράσινο που υιοθετήθηκε για την μελέτη της χλωροφύλλης σε ανοιχτές θάλασσες όπως οι ωκεανοί. Τα περισσότερα είδη φυτοπλαγκτού απορροφούν το μπλε φως πιο έντονα από το πράσινο. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθούν μηχανικές τεχνικές όπως τα νευρωνικά δίκτυα, μηχανικές διανυσματικής υποστήριξης και υβριδικά μοντέλα ενεργητικής μάθησης.

Σε αντίθεση με τον ανοιχτό ωκεανό, όπου οι αλγόριθμοι ανάκτησης μπορούν εύκολα να καθοριστούν από τις επιδράσεις του φυτοπλαγκτού και τα υποπροϊόντα του, οι αλγόριθμοι για τα εσωτερικά και τα παράκτια ύδατα παρουσιάζουν ποικίλα προβλήματα όπου η πρόσθετη οπτική επίδραση των αιωρούμενων ορυκτών και των διαλυμένων οργανικών ουσιών πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι ημι-αναλυτικοί

αλγόριθμοι βασίζονται σε βιο-γεω-οπτικά μοντέλα που καθορίζουν τις σχέσεις μεταξύ της ακτινοβολίας που αφήνει το νερό σε σχέση και με τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες των βιογεωχημικών συστατικών. Τέλος, η επιλογή προσέγγισης ή ο συνδυασμός διαφόρων προσεγγίσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα των υπό εξέταση υδάτων, τα οπτικώς ενεργά συγκεντρωτικά εύρη, τα φασματικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα στον οποίο θα εφαρμοστούν, την ποσότητα των διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες, καθώς και τον χρόνο υπολογισμού (Greb *et al.* 2018).

1.6 Τηλεπισκόπηση Ποιότητας Υδάτων

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας, μέρος αυτής αντανακλάται απευθείας από την επιφάνεια, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας διεισδύει στη στήλη νερού και αλληλεπιδρά όχι μόνο με το νερό αλλά και με τα οργανικά και τα ανόργανα υλικά που διαλύονται και αιωρούνται μέσα στη στήλη ύδατος. Τα συστατικά που αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, ονομάζονται οπτικά ενεργά συστατικά. Αυτό οφείλεται στις διαδικασίες απορρόφησης και σκέδασης του φωτός. Τα οπτικά ενεργά συστατικά έχουν μετρήσιμα, συχνά μοναδικά, χαρακτηριστικά απορρόφησης και σκέδασης. Καθορίζουν το μέγεθος και τα φασματικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται, απορροφάται ή σκεδάζεται σε διαφορετικά μήκη κύματος στην ορατή και κοντινή περιοχή του φάσματος. Με τον τρόπο αυτό, ανιχνεύεται η συμπεριφορά του φωτός μέσα στο νερό από αισθητήρες τοποθετημένους σε απομακρυσμένη πλατφόρμα, όπως ο δορυφόρος και μπορεί να ερμηνευτεί η ποιότητα των υδάτων με βάση διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων (Καρτάλης & Φειδάς 2015).

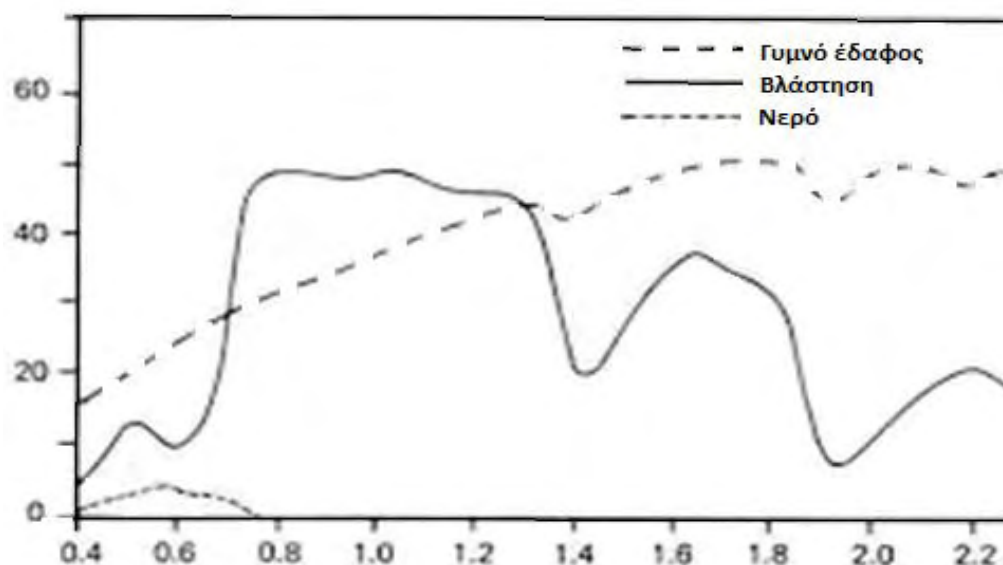
Το βάθος στο οποίο μπορεί να διεισδύσουν οι ακτίνες του ήλιου οι οποίες αντιπροσωπεύουν και το βάθος διείσδυσης του δορυφορικού σήματος, εξαρτάται τόσο από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όσο και από τη σύνθεση του νερού. Σε πολύ θολά ύδατα, το δορυφορικό σήμα μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικό μόνο για λίγα εκατοστά της υδάτινης στήλης, ενώ σε καθαρότερα νερά μπορεί να φτάσει έως και δεκάδες μέτρα βάθους. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου συναντάμε καθαρά και ρηχά νερά, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διεισδύσει έως τον πυθμένα της θάλασσας και να ανακλαστεί επηρεάζοντας έτσι την ανακλαστικότητα των υδάτων. Σε τέτοια ύδατα το βάθος του πυθμένα, ο τύπος υποστρώματος και η βλάστηση που υπάρχει θα πρέπει να συνεκτιμηθούν (Lee *et al.* 2007, Leiper *et al.* 2014).

Τα φυσικά χαρακτηριστικά και η σύσταση του κάθε αντικειμένου έρευνας επηρεάζουν το ποσοστό της ακτινοβολίας που αντανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος. Η ανακλώμενη ακτινοβολία μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ , ονομάζεται φασματική απόκριση. Κάθε επιφάνεια έχει διαφορετική και μας επιτρέπει να διακρίνουμε τη διαφοροποίηση μιας περιοχής από μια άλλη, καθώς και τις ιδιότητές της (σχήμα, μέγεθος) (Καρτάλης & Φείδας 2015).

Η καμπύλη που παρουσιάζει η φασματική απόκριση σε σχέση με το μήκος κύματος λ , ονομάζεται φασματική υπογραφή και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια. Είναι το βασικό χαρακτηριστικό της κάθε επιφάνειας και με αυτόν τον τρόπο διακρίνουμε και αναγνωρίζουμε το μεταξύ τους διαχωρισμό (Εικ. 1.5) (Καρτάλης & Φείδας 2015).

Ειδικότερα, η φασματική υπογραφή του νερού καταγράφεται ως μία καμπύλη που παρουσιάζει τοπικό μέγιστο γύρω στα 0,5 μm με τιμή προσεγγιστικά στο 10% της

ανακλαστικότητα. Παρουσιάζει μια μετατόπιση παράλληλα ως προς τον οριζόντιο άξονα των μηκών κύματος, για λόγους διαφορετικής ανακλαστικότητας που έχει το νερό, σύμφωνα με διάφορες βιβλιογραφικές αναφορές (Schowencerd 1983). Παρατηρούμε ότι η φασματική υπογραφή μηδενίζεται σχεδόν στις περιοχές των μηκών κύματος 0,8-0,9 μm .



Εικόνα 1.5: Τυπικές καμπύλες φασματικής ανακλαστικότητας για τη βλάστηση, το νερό και το έδαφος (Καρτάλης & Φειδάς 2015).

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη φασματική υπογραφή του νερού είναι η θολερότητα που μπορεί να υπάρχει και να οφείλεται σε ρύπους, ιζήματα, ή και λόγω αναταραχής της υδάτινης επιφάνειας. Επίσης, άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη φασματική υπογραφή είναι η περιεκτικότητα του νερού σε βιομηχανικά ή γεωργικά απόβλητα που ευνοούν την ανάπτυξη μικροοργανισμών και τέλος, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη-α με αποτέλεσμα η φασματική υπογραφή του νερού να αυξάνεται στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο πράσινο χρώμα (Περάκης και συν. 2015).

Οι παράμετροι της ποιότητας του νερού οι οποίες είναι άμεσα μετρήσιμες με την τηλεπισκόπηση, είναι η διαφάνεια του νερού - υπάρχουν πολλές εμπειρικές ή αναλυτικές προσεγγίσεις για την εκτίμησή της, όπως ο δίσκος του Secchi ή το βάθος διείσδυσης του φωτός (Lee *et al.* 2005, Olmanson *et al.* 2008, Doron *et al.* 2011, Binding *et al.* 2015). Μία άλλη παράμετρος είναι η χλωροφύλλη-α ως δείκτης της συνολικής βιομάζας του φυτοπλαγκτού ενώ ποικιλία αλγορίθμων είναι πλέον διαθέσιμη για ευρύτερες παράκτιες και εσωτερικές υδάτινες περιοχές. Επίσης, η ανάπτυξη άλγης (εκτός από την χλωροφύλλη-α), μετράται με ειδικούς χρωστικούς δείκτες, όπως για τα κυανοφύκη και για τα κυανοβακτήρια, ή με άλλα μοναδικά φασματικά χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν την ταυτοποίηση τοξικής βλάστησης, καθώς και μέτρα για τη χωρική έκταση, τον βαθμό επιβάρυνσης και τη διάρκειά της. (Matthews *et al.* 2012, Stumpf *et al.* 2012, Clark *et al.* 2017, Urquhart *et al.* 2017, Binding *et al.* 2018). Η υποθαλάσσια και η επιπλέουσα υδρόβια βλάστηση αποτελεί και αυτή μια παράμετρο (Gower *et al.* 2006, Hu 2009, Shuchman *et al.* 2013). Άλλη μια παράμετρος είναι η σύνθεση του υποστρώματος και το βάθος τα οποία μπορούν να ανακτηθούν σε ρηχά νερά όπου η απόκριση του πυθμένα είναι σημαντική (Lee *et al.* 2007, Vahtmäe & Kutser 2007, Dekker *et al.* 2011). Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS, Total Suspended Solids) αποτελούν και αυτά μια παράμετρο, για την οποία υπάρχουν διαθέσιμοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό τους με σκοπό τη μελέτη της δυναμικής των ποταμών, της διάβρωσης των ακτών και των πυθμένων (Stumpf & Pennock 1989, Doxaran *et al.* 2003, Dogliotti *et al.* 2015, Han *et al.* 2016). Επίσης, η οργανική ύλη του νερού, η οποία μπορεί να ανακτηθεί από εκθετική γραφική παράσταση απορρόφησης, και έχει συμβάλει σε πολλές έρευνες της δυναμικής και του βιογεωχημικού κύκλου των παράκτιων και των εσωτερικών υδάτων (Mannino *et al.* 2014). Ο οργανικός άνθρακας

μπορεί επίσης να μετρηθεί στο υδάτινο περιβάλλον (Brezonik *et al.* 2015). Η μέτρηση της θερμοκρασίας των επιφανειακών υδάτων αποτελεί μια παράμετρο, η οποία αν και δεν προέρχεται από το υδάτινο χρώμα, συμπεριλαμβάνεται ως μια παράμετρος που εύκολα υπολογίζεται μέσω της τηλεπισκόπησης χρησιμοποιώντας τη θερμική υπέρυθρη ή την παθητική τηλεπισκόπηση μικροκυμάτων (Reynolds *et al.* 2007). Τέλος, οι πετρελαιοκηλίδες, οι οποίες τυπικά ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας ενεργούς αισθητήρες μικροκυμάτων, όπως το συνθετικό Aperture Radar. Παρ' όλα αυτά όμως η οπτική απεικόνιση προσφέρει και κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα, όπως τη διάκριση των επιφανειακών πετρελαιοκηλίδων από τα φύκη (Brekke & Solberg 2005).

Μια παράμετρος της ποιότητας του νερού η οποία δεν είναι άμεσα μετρήσιμη με την τηλεπισκόπηση, είναι η τροφική κατάσταση των υδάτων, που καθορίζεται μεταξύ άλλων από τη βιομάζα του πλαγκτού ή και τη διαύγεια του νερού (Olmanson *et al.* 2008, Matthews *et al.* 2012, Binding *et al.* 2015). Η πρωτογενής παραγωγικότητα, μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από τη χλωροφύλλη-α (Behrenfeld & Falkowski 1997).

Επίσης, οι βιοτοξίνες οι περισσότερες εκ των οποίων είναι άχρωμες και έτσι δεν είναι άμεσα μετρήσιμες από την τηλεπισκόπηση. Η τοξικότητα ορισμένων κυανοβακτηρίων μπορεί να συσχετιστεί με άλλες φυκο-κυτταροπρωτεΐνες, ωστόσο όμως δεν είναι όλα τα κυανοβακτήρια τοξικά. Οι τοξίνες μπορεί να παραμείνουν στο υδάτινο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και μετά το θάνατο των τοξικών μικροοργανισμών. Ως εκ τούτου η ανίχνευση τέτοιων τοξικών μικροοργανισμών είναι δύσκολη και παραμένει μια πρόκληση για τη δορυφορική τηλεπισκόπηση (Stumpf *et al.* 2016). Τα θρεπτικά άλατα είναι άλλη μια παράμετρος. Αν και το άζωτο και ο φώσφορος δεν επηρεάζουν άμεσα τη φασματική απεικόνιση του νερού, συμβάλλουν όμως έμμεσα στη μεταβολή του χρώματός του μέσω της αύξησης του φυτοπλαγκτού. Οι προσεγγίσεις με

βάση τη χαρτογράφηση και τη μέτρηση των θρεπτικών αλάτων ποικίλουν σε χωρικό και χρονικό επίπεδο, λόγω των διακυμάνσεών τους και της σύνθεσης του φυτοπλαγκτού και του ζωοπλαγκτού (Filstrup *et al.* 2014). Συχνά η εκτίμησή τους βασίζεται στην αύξηση της χλωροφύλλης-α, αφού το άζωτο και ο φώσφορος αποτελούν περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης του φυτοπλαγκτού. Επίσης, το διαλυμένο οξυγόνο είναι μη μετρήσιμο με την τηλεπισκόπηση. Παρόλα αυτά μετρήσιμες παράμετροι όπως η θερμοκρασία μπορεί να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την ανίχνευση συνθηκών υποξίας, όπως αυτή που έχει παρατηρηθεί π.χ. στον Κόλπο του Μεξικού (Gower *et al.* 2006) και στη λίμνη Erie που βρίσκεται μεταξύ των ΗΠΑ και του Καναδά (Zhou *et al.* 2015).

Το Copernicus είναι ένα πρόγραμμα που συλλέγει δεδομένα μέσω δορυφόρων, από επίγεια, αερομεταφερόμενα και θαλάσσια συστήματα μέτρησης, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Επεξεργάζεται τα στοιχεία αυτά και στη συνέχεια παράγει δεδομένα, καθώς και μακροχρόνιες στατιστικές πληροφορίες, ετών ή ακόμα και δεκαετιών. Το σύνολο των δεδομένων αυτών είναι συγκρίσιμο και μπορεί να επεξεργαστεί και να χρησιμοποιηθεί με σκοπό την παρακολούθηση αλλαγών του περιβάλλοντος, καθώς και για τη διεξαγωγή προβλέψεων. Οι πληροφορίες που παρέχονται από τις υπηρεσίες του προγράμματος Copernicus, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς (π.χ. τη διαχείριση των αστικών περιοχών, την αειφόρο ανάπτυξη και την προστασία της φύσης, τον περιφερειακό και τοπικό σχεδιασμό, τη γεωργία, τη δασοκομία και την αλιεία, την υγεία, την πολιτική προστασία, τις υποδομές, τις μεταφορές και την κινητικότητα, καθώς και τον τουρισμό). Επίσης, παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ανάπτυξη της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, καθώς και για τη λήψη

αποφάσεων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπως μια φυσική καταστροφή ή μια ανθρωπιστική κρίση.

Το πρόγραμμα συντονίζεται και διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Εφαρμόζεται σε συνεργασία με τα κράτη μέλη, την Ευρωπαϊκή Εταιρία Διαστήματος (ESA), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (EUMETSAT), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (ECMWF), τους Οργανισμούς της ΕΕ και την Mercator Océan.

Στο πλαίσιο του προγράμματος Copernicus έχουν τεθεί σε τροχιά αρκετοί δορυφόροι και εκτιμάται να φτάσουν τους 20 έως το 2030, δηλ.:

- Η σειρά Sentinel-1 αποτελείται από το Sentinel-1A και το Sentinel-1B, οι οποίοι τέθηκαν σε τροχιά στις 3 Απριλίου 2014 και στις 25 Απριλίου 2016, αντίστοιχα. Έχουν ως αποστολή την απεικόνιση της γης και των ωκεανών σε όλες τις καιρικές συνθήκες.

- Η σειρά Sentinel-2 αποτελείται από τους Sentinel-2A και Sentinel-2B, οι οποίοι τέθηκαν σε τροχιά στις 23 Ιουνίου 2015 και στις 7 Μαρτίου 2017, αντίστοιχα. Η αποστολή τους είναι η απεικόνιση υψηλής ανάλυσης, για την κάλυψη εδάφους και υδάτων σε εσωτερικές και παράκτιες περιοχές.

- Η σειρά Sentinel-3 αποτελείται από τους Sentinel-3A (τέθηκε σε τροχιά στις 16 Φεβρουαρίου 2016) και Sentinel-3B (βρίσκεται σε τροχιά από τις 25 Απριλίου 2018). Είναι μια αποστολή πολλαπλών οργάνων καταγραφής της τοπογραφίας και της θερμοκρασίας της θάλασσας και της επιφάνειας της γης, του χρώματος των ωκεανών και του χερσαίου περιβάλλοντος.

- Ο δορυφόρος Sentinel-5P είναι ο πρόδρομος του Sentinel-5. Τέθηκε σε τροχιά στις 13 Οκτωβρίου 2017 και έχει ως αποστολή να παρέχει έγκαιρα δεδομένα για

συγκεντρώσεις ιχθών αερίων και αερίων που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα και το κλίμα.

- Ο Sentinel-4 θα τεθεί σε γεωστατική τροχιά σε δορυφόρο Meteosat τρίτης γενιάς (MTG-S). Αποστολή του είναι η παρακολούθηση της ατμόσφαιρας.

- Ο Sentinel-5 θα έχει ως αποστολή την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας επί του δορυφόρου πολικής τροχιάς MetOp δεύτερης γενιάς.

- Ο Sentinel-6 θα έχει ως αποστολή τη καταγραφή του παγκόσμιου ύψους της θάλασσας, κυρίως για την επιχειρησιακή ωκεανογραφία και για τις κλιματικές μελέτες (ESA, European Space Agency)

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι η τηλεπισκόπηση παρέχει έγκυρους, αξιόπιστους και συνοπτικούς χάρτες ποιότητας νερού και συνεισφέρει συστηματικά στα προγράμματα παρακολούθησης και ανάλυσης ποιότητας των υδάτων (Stumpf *et al.* 1989, Lee *et al.* 2005, Thomas *et al.* 2005, Vittorio *et al.* 2007, Akbar *et al.* 2010, Ιωακειμίδης 2012, Jisang & Minha 2015, Καρτάλης & Φειδάς 2015, Περάκης 2015, Mohammad *et al.* 2016, Congedo 2018). Επίσης, έχουν γίνει έρευνες σχετικά με την ποιότητα των υδάτων σε λίμνες και ποτάμια (Kloiber *et al.* 2000, Heidi *et al.* 2006, Wang *et al.* 2006, Alparslan *et al.* 2007, Olmanson *et al.* 2008, Nas *et al.* 2010, Binding *et al.* 2015, Kaire *et al.* 2016, Ψωμιάδης και συν. 2017, Binding *et al.* 2018) και σε παράκτιες ζώνες και ωκεανούς (Siamak *et al.* 1991, Gower *et al.* 2006, Brando & Phinn 2007, Doron *et al.* 2007, Hu 2009, Dekker *et al.* 2011, Doron *et al.* 2011, Wu *et al.* 2015, Greb *et al.* 2018).

Υπάρχουν επίσης πολλές αναλυτικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της ποσότητας του φυτοπλακτού (Sathyendranath *et al.* 1989, Behrenfeld *et al.* 1997, Filstrup *et al.* 2014, Clark *et al.* 2017), καθώς και για την αύξηση της συγκέντρωσης των θρεπτικών

αλάτων (Stumpf *et al.* 2012, Leiper *et al.* 2014, Zhou *et al.* 2015, Stumpf *et al.* 2016, Urquhart *et al.* 2017).

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες μέσω της τηλεπισκόπησης, σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον λόγω αυξομειώσεων διαφόρων παραμέτρων του νερού, ορισμένες εκ των οποίων μπορεί να είναι ορατές (Stumpf & Pennock 1989, Doxaran *et al.* 2003, Brekke & Solberg 2005, Gower *et al.* 2006, Lee *et al.* 2007, Reynolds *et al.* 2007, Vahtmäe & Kutser 2007, Dekker *et al.* 2011, Matthews *et al.* 2012, Stumpf *et al.* 2012, Shuchman *et al.* 2013, Brezonik *et al.* 2015, Dogliotti *et al.* 2015, Han *et al.* 2016, Clark *et al.* 2017, Urquhart *et al.* 2017, Binding *et al.* 2018) και ορισμένες οι οποίες δεν είναι ορατές και μπορεί να εκτιμηθεί η συγκέντρωσή τους σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους (Behrenfeld & Falkowski 1997, Lee *et al.* 2005, Olmanson *et al.* 2008, Matthews *et al.* 2012, Filstrup *et al.* 2014, Zhou *et al.* 2015, Heipke *et al.* 2016, Stumpf *et al.* 2016, Kahru 2017, Binding *et al.* 2018).

1.7 Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας παρακολούθησης συγκεντρώσεων θρεπτικών αλάτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος ιχθυοκαλλιεργητικών μονάδων με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη του σκοπού αυτό:

- Χρησιμοποιήθηκαν επίγειες μετρήσεις θρεπτικών αλάτων από προηγούμενες έρευνες.
- Επιλέχθηκαν δορυφορικές εικόνες Sentinel-2^A που χρονικά είναι κοντά στις μετρήσεις.

- Έγιναν ατμοσφαιρικές διορθώσεις.
- Εξάχθηκαν φασματικές υπογραφές στα σημεία δειγματοληψίας.
- Συσχετίστηκαν οι τιμές των εικονοστοιχείων των δορυφορικών δεδομένων με τις επίγειες μετρήσεις για διαφορετικά βάθη (0, 5, 10 και 20 m).
- Εξάχθηκαν σχέσεις μεταξύ των θεραπευτικών παραμέτρων και των δορυφορικών δεδομένων για διαφορετικά φασματικά κανάλια.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχές μελέτης

Ως περιοχές έρευνας επιλέχθηκαν δύο ιχθυοκαλλιέργειες του Παγασητικού κόλπου. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν από προγενέστερες μεταπτυχιακές διατριβές του Τμήματος (Φλώρου 2017, Παπαδημητρίου 2018). Αυτό έγινε με σκοπό να υπάρξει ένα κατά το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα τιμών, έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι επιδράσεις της ιχθυοκαλλιεργητικής δραστηριότητας στο υδάτινο περιβάλλον με τη χρήση της τηλεπισκόπησης.

Συγκεκριμένα, η πρώτη μονάδα εκτροφής βρίσκεται στον Όρμο Λημνιώνας στην περιοχή της Μηλίνας, ο οποίος βρίσκεται στις νοτιοανατολικές ακτές του Παγασητικού κόλπου, μεταξύ των οικισμών Τρίκερι και Μηλίνα. Σε αυτή την περιοχή είχαν πραγματοποιηθεί δυο δειγματοληψίες το καλοκαίρι και το φθινόπωρο του 2016. Η συγκεκριμένη μονάδα ιχθυοκαλλιέργειας λειτουργεί από το 1990, είναι δυναμικότητας 130 τόνων και αποτελείται από 8 ιχθυοκλωβούς διαστάσεων από 5X5 m μέχρι 7,5X7,5 m. Το βάθος των διχτυών τους είναι από 5 έως 7,5 m, ενώ το μέσο βάθος στο σημείο εγκατάστασης της μονάδας είναι 36 m. Τα κύρια είδη εκτροφής είναι η τσιπούρα (*Sparus aurata*) και το λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) (Φλώρου 2017).

Η δεύτερη μονάδα από την οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βρίσκεται κοντά στις Νηές. Ειδικότερα οι εγκαταστάσεις της ιχθυοκαλλιέργειας αυτής βρίσκονται στη θέση "Όρμος Λαδικού", της Δ.Ε. Σούρπης του Δήμου Αλμυρού και σε αυτή τη μονάδα εκτρέφονται τα δύο βασικά είδη της μεσογειακής ιχθυοκαλλιέργειας, το λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*) και η τσιπούρα (*Sparus aurata*). Η μέγιστη ετήσια δυναμικότητά της είναι 300 τόνοι και λειτουργεί από το 1992. Η θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνει είναι 20 στρέμματα και το μέσο βάθος στη θέση εγκατάστασης είναι 35

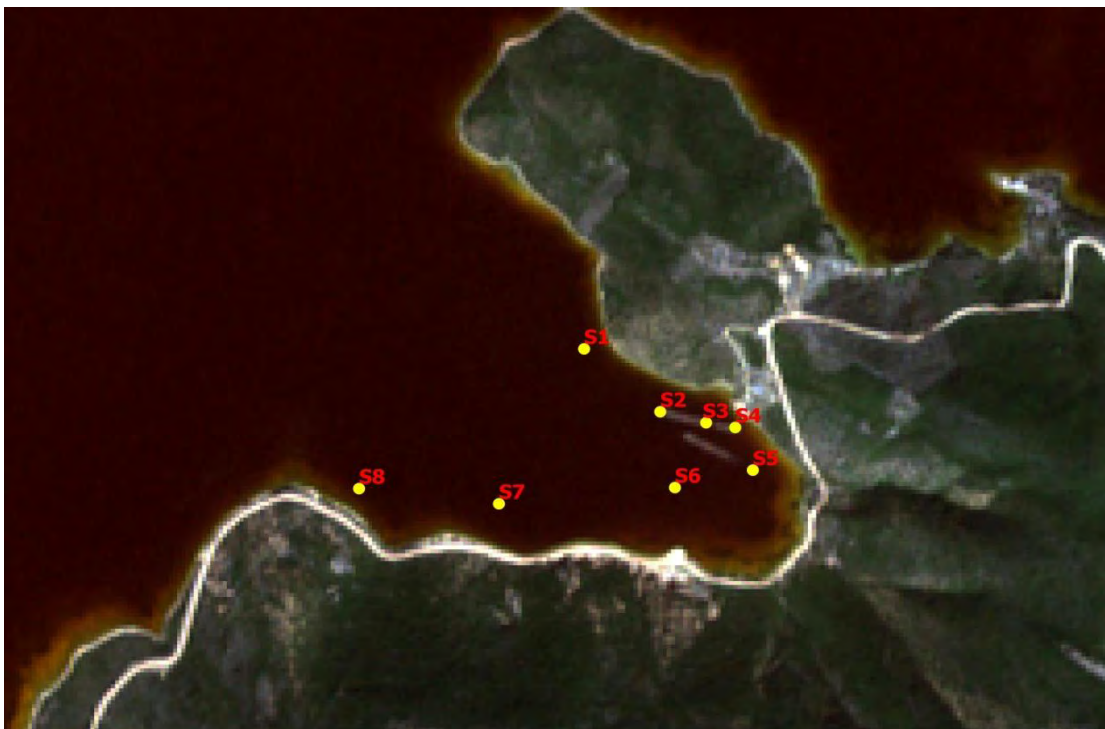
m. Αποτελείται από 27 πλωτούς ιχθυοκλωβούς διαφόρων τύπων, συνολικής επιφάνειας 5.437,4 m². Στη συγκεκριμένη περιοχή πραγματοποιήθηκαν δυο δειγματοληψίες, την Άνοιξη και το Καλοκαίρι του 2017 (Παπαδημητρίου 2018).

Στις δύο αυτές έρευνες χρησιμοποιήθηκε συνεχής καταγραφέας CTD (SEABIRD-19 plus) για την καταγραφή φυσικοχημικών παραμέτρων στη στήλη του νερού από την επιφάνεια έως τον πυθμένα. Επίσης, συλλέχθηκαν δείγματα νερού από την επιφάνεια, τα 5 m και κάθε 10 m μέχρι τον πυθμένα για την ανάλυση των θρεπτικών αλάτων του νερού (αμμωνιακά, νιτρώδη, νιτρικά, φωσφορικά και πυριτικά) (Φλώρου 2017, Παπαδημητρίου 2018).

Στις Εικόνες 2.1 και 2.2 φαίνονται τα σημεία δειγματοληψίας για την ιχθυοκαλλιέργεια στην περιοχή Νηές και Μηλίνα, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.1: Θέσεις δειγματοληψίας της ιχθυοκαλλιέργειας στην περιοχή Νηές.



Εικόνα 2.2: Θέσεις δειγματοληψίας της ιχθυοκαλλιέργειας στην περιοχή της Μηλίνας.

2.2 Δορυφορικά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το δορυφόρο Sentinel-2^A (Εικ. 2.3), ο οποίος παρέχει δεδομένα υψηλής χωρικής, χρονικής και φασματικής διακριτικής ικανότητας. Τέθηκε σε τροχιά από τον πύραυλο Vega, από τον Ευρωπαϊκό Διαστημικό Σταθμό που βρίσκεται κοντά στο Κούρου στην Γαλλική Γουινέα (Περάκης 2015). Διαθέτει ένα σαρωτή πολυφασματικής απεικόνισης υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας, με συχνή επαναδιέλευση και καταγραφή της επιφάνειας της γης. Ο πολυφασματικός σαρωτής του δορυφόρου αυτού, περιλαμβάνει 13 φασματικές περιοχές με εύρος σάρωσης 290 Km. Βρίσκεται σε τροχιά ύψους 786 Km από την επιφάνεια της γης. Οι πληροφορίες που παρέχονται από τους δορυφόρους Sentinel, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό αλλαγών στην επιφάνεια της γης, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα (*User Guides Spatial Resolution 2018*, <https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>).



Εικόνα 2.3: Δορυφόρος Sentinel-2 (πηγή: [User Guides - Sentinel-2 MSI](#)).

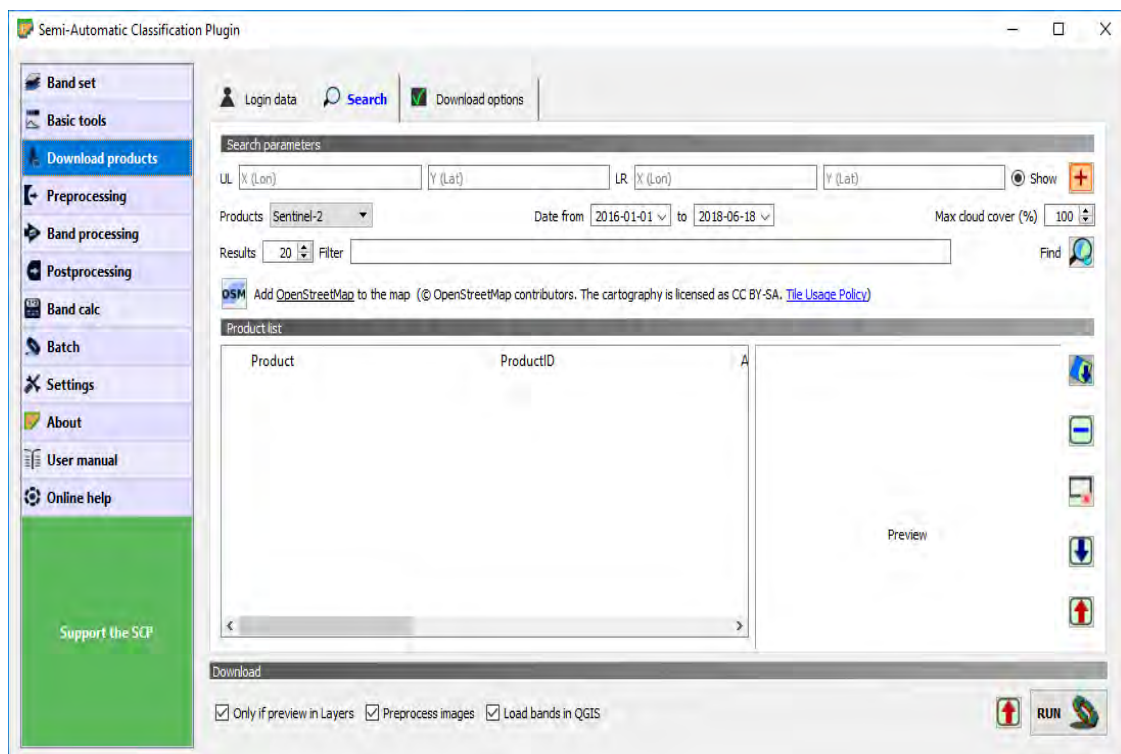
2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα

Για την επιλογή των δορυφορικών δεδομένων, πρώτα εξετάστηκαν τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής για να υπάρξει μία ένδειξη πιθανής βροχόπτωσης, η οποία θα καθιστούσε αλλοιωμένο το αποτέλεσμα των δορυφορικών μετρήσεων. Τα φερτά υλικά που καταλήγουν στο υδάτινο περιβάλλον επηρεάζουν την ανάκλασή του. Παρόλα αυτά, στις δύο περιοχές που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες στις συγκεκριμένες ημερομηνίες δεν υπήρξε βροχόπτωση.

2.4 Ανάκτηση και Επιλογή δεδομένων

Οι πληροφορίες που διατέθηκαν μέσω του προγράμματος Copernicus, εξάχθηκαν από τον συσχετισμό των μετρήσεων με τη φύση και την κατανομή των υλικών που βρίσκονται στην επιφάνειά της.

Τα δορυφορικά δεδομένα που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ήταν όσο πιο κοντά χρονικά στις ημερομηνίες δειγματοληψίας και αυτό έγινε με τη χρήση του «Semi-Automatic Classification Plugin» του QGIS (Εικόνα 2.4) και φαίνονται στις Εικόνες 2.5 - 2.8.

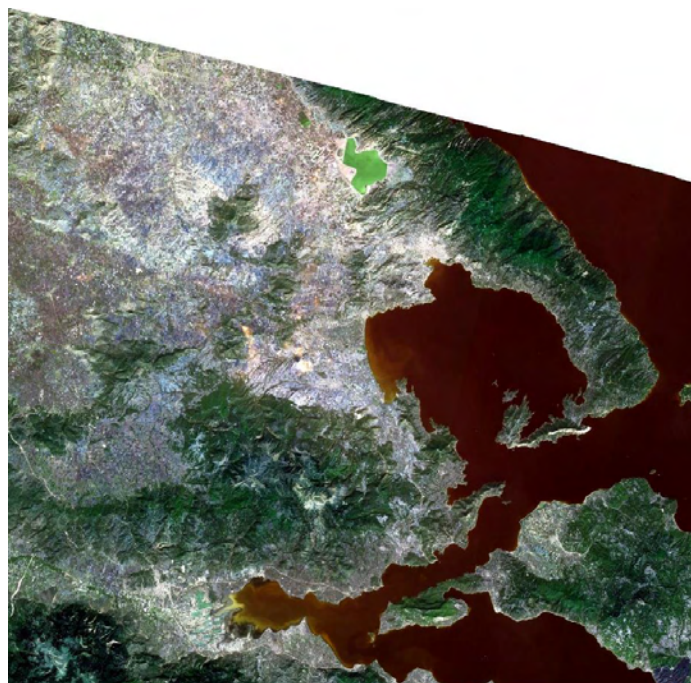


Εικόνα 2.4: Πρόγραμμα QGIS, Semi-Automatic Classification Plugin (<https://qgis.org/>).

Η χωρική διακριτική ικανότητα που χρησιμοποιήθηκε από το Sentinel-2 είναι τα 10 m και τα 20 m και αντιστοιχούν σε διαφορετικές φασματικές περιοχές (Εικόνα 2.9). Τα 60 m χωρικής διακριτικής ικανότητας κρίθηκαν ανεπαρκή για τη συγκεκριμένη έρευνα, επειδή πρόκειται για παράκτιες περιοχές που αποτελούνται από έντονο ανάγλυφο με πετρώματα και διακυμάνσεις στα βάθη. Για τον λόγο αυτό τα 60 m χωρικής διακριτικής ικανότητας δεν θα μπορούσαν να παρουσιάσουν την ακριβή ανάκλαση των υδάτων και τα αποτελέσματα θα ήταν ανακριβή.



Εικόνα 2.5 : Δορυφορική εικόνα RGB του Sentinel-2A (30/6/2016).



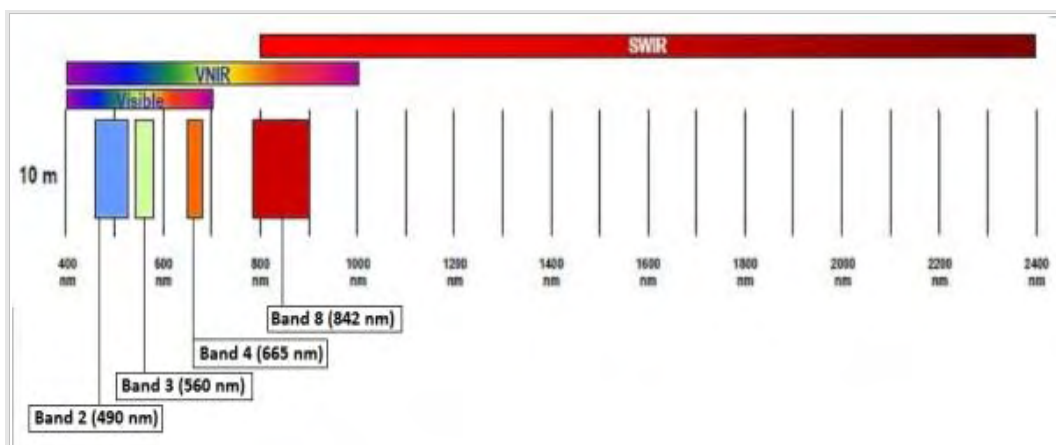
Εικόνα 2.6 : Δορυφορική εικόνα RGB του Sentinel-2A (1/10/2016).



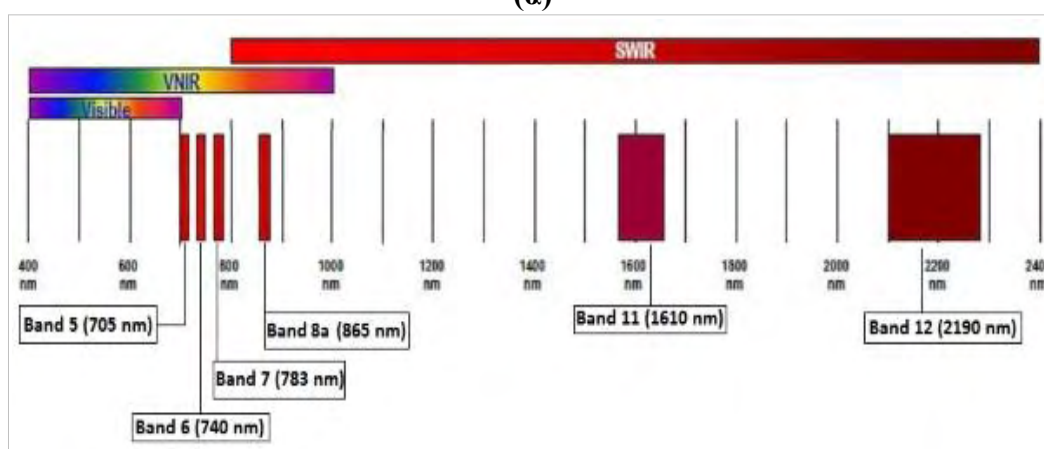
Εικόνα 2.7: Δορυφορική εικόνα RGB του Sentinel-2A (5/6/2017).



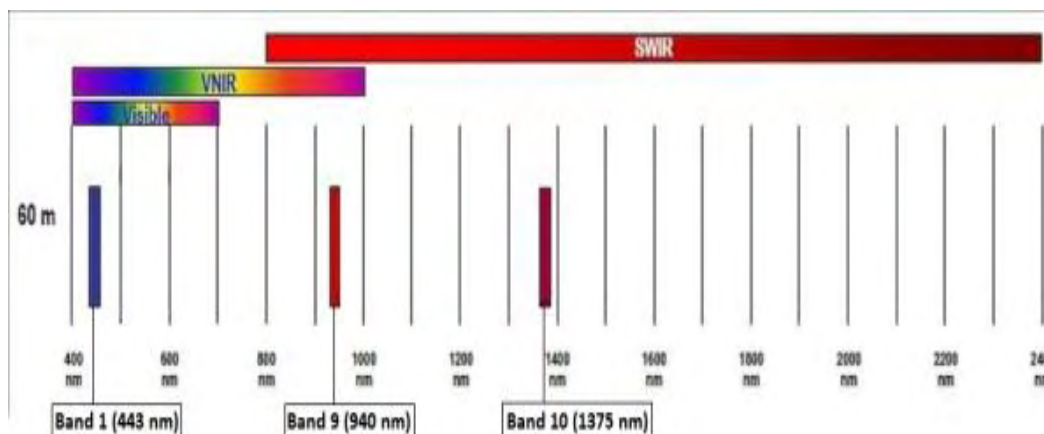
Εικόνα 2.8 : Δορυφορική εικόνα RGB του Sentinel-2A (25/7/2017).



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2.9 : SENTINEL-2 ζώνες χωρικής ανάλυσης στα 10 m χωρική διακριτική ικανότητα, B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) και B8 (842 nm) (α), στα 20 m χωρική διακριτική B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) και B12 (2190 nm) (β) και στα 60 m χωρική διακριτική B1 (443 nm), B9 (940 nm), B10 (1375 nm) (γ). (πηγή: ESA, <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>).

2.5 Προεπεξεργασία δεδομένων- Ατμοσφαιρικές διορθώσεις

Η ανάκτηση καθώς και η ανάλυση των πληροφοριών που προέρχονται από τις εικόνες προϋποθέτουν αρχικά την επεξεργασία τους. Για την επεξεργασία των δορυφορικών και γεωγραφικών πληροφοριών απαιτείται εξειδικευμένο λογισμικό. Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία είναι το QGIS που αναπτύχθηκε από τον Gary Sherman στις αρχές του 2002 και διατηρείται από εθελοντές προγραμματιστές που εκδίδουν τακτικά ενημερώσεις και διορθώσεις σφαλμάτων του λογισμικού (<https://qgis.org/>). Είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται στην Τηλεπισκόπηση και στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και είναι ευρέως αναγνωρισμένο, σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγει, να επεξεργάζεται, να αποθηκεύει, να ενημερώνει, να διαχειρίζεται, να ανακτά, να αναλύει και να συνδυάζει όλους τους τύπους των γεωγραφικών πληροφοριών.

Οι κυριότεροι λόγοι που συντέλεσαν στην ανάπτυξη του λογισμικού QGIS τα τελευταία 20 χρόνια, ήταν η μεγάλη ανάπτυξη της πληροφορικής και το μειωμένο κόστος των προγραμμάτων, η αυτοματοποίηση στη σχεδίαση χαρτών με υψηλή ποιότητα απόδοσης, η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, η αυτοματοποίηση της διάχυσης της πληροφορίας, η αδυναμία επεξεργασίας του μεγάλου αριθμού στοιχείων με τους παραδοσιακούς τρόπους και τέλος, η ανάπτυξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων υψηλής ποιότητας (Καρτάλης & Φειδάς 2015).

Δηλαδή επιτρέπει στους χρήστες να αναλύουν και να επεξεργάζονται χωρικές πληροφορίες, δίνοντάς τους έτσι τη δυνατότητα εξειδικευμένων διαδικασιών που απαιτούνται στην τηλεπισκόπηση και τα GIS. Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με το λογισμικό QGIS, μπορεί να αποδώσει σημαντικά οφέλη

ικανοποιώντας τις αυξημένες ανάγκες για άμεση και ακριβή απόκτηση πληροφοριών γύρω από περιβαλλοντικά θέματα (Ιωακειμίδης 2012).

Μαζί με το QGIS διατίθεται και το λογισμικό SAGA, το οποίο ξεκίνησε από μια μικρή ομάδα ερευνητών του Τμήματος Φυσικής Γεωγραφίας στο Gottingen. Το λογισμικό SAGA προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύνολο γεωεπιστημονικών μεθόδων και παρέχει ένα εύκολα προσβάσιμο περιβάλλον προς χρήση, με πολλές επιλογές απεικόνισης (<http://www.saga-gis.org/>).

Για τις ραδιομετρικές διορθώσεις χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο του QGIS, το οποίο ονομάζεται «Semi-Automatic Classification Plugin» (Ημι-αυτόματη προσθήκη ταξινόμησης) και χρησιμοποιεί τη μέθοδο του σκοτεινού αντικειμένου (DOS), η οποία είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, όταν σε μια εικόνα κάποια εικονοστοιχεία της είναι σε πλήρη σκιά τότε η ακτινοβολία τους που λαμβάνεται από τον δορυφόρο οφείλεται σε ατμοσφαιρική σκέδαση. Ωστόσο, στην επιφάνεια της γης υπάρχουν πολύ λίγα σημεία τα οποία είναι απολύτως μαύρα, οπότε η παραδοχή της ελάχιστης ανακλαστικότητας κατά 1% είναι καλύτερη από το 0% (Congedo 2018).

2.6 Φασματικές υπογραφές

Οι φασματικές υπογραφές αυτών των θρεπτικών, αναγνωρίστηκαν από την απόχρωση που είχαν, ύστερα από τη διαδικασία επεξεργασίας που προηγήθηκε στις ψηφιακές εικόνες. Για την επικάλυψη των διανυσματικών δεδομένων με τα δορυφορικά, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα QGIS. Με την επιλογή της κατάλληλης θέσης των σημείων δειγματοληψίας και των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε αυτά, εξάγουμε τις τιμές τους.

Έγινε η επιλογή των δεδομένων και των τεχνικών επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση και τη μελλοντική χαρτογράφηση των υδάτων που υπάρχουν στις περιοχές. Επιλέχθηκαν τα κανάλια από κάθε δορυφόρο που αντανακλούν-παρουσιάζουν φασματικά χαρακτηριστικά των θρεπτικών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συνδυασμοί καναλιών και λόγων καναλιών, αναλόγως και με το εύρος της φασματικής διακριτικής ικανότητας που διέθεταν (Πίν. 2.1) για την ανάδειξη των φασματικών υπογραφών του κάθε στοιχείου. Για την οπτική ερμηνεία αυτών των συνδυασμών χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακές εικόνες (RGB), που απεικονίζονται μέσω προσθετικών έγχρωμων σύνθετων, χρησιμοποιώντας τα τρία κύρια χρώματα, δηλαδή το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε.

2.7 Συσχέτιση μετρήσεων

Στη συνέχεια έγινε έλεγχος και συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις επίγειες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις δύο περιοχές. Τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συσχετίστηκαν με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα των επίγειων μετρήσεων. Μέσω αυτής της διαδικασίας εξετάστηκε εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των τιμών ανάκλασης, σε διαφορετικά μήκη κύματος και των τιμών των παραμέτρων από τις επίγειες μετρήσεις. Ασφαλώς υπήρξε ανομοιομορφία στην παράκτια περιοχή, τόσο στο υλικό του πυθμένα όσο και στο βάθος, τα οποία επηρέασαν την ανάκλαση των υδάτων. Επίσης, επιλέχθηκαν τα σημεία μέτρησης που δεν βρίσκονταν κοντά σε ιχθυοκλωβούς, τα οποία παρουσίασαν σχετικά χαμηλή ποιότητα ανάγνωσης σε σύγκριση με τα σημεία μέτρησης που απήχαν από αυτούς.

Πίνακας 2.1: Φασματική διακριτική ικανότητα στα 10 m (α), στα 20 m (β) από το Sentinel-2A και 2B (ESA, https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook).

Band number	S2A		S2B	
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
2	496.6	98	492.1	98
3	560.0	45	559	46
4	664.5	38	665	39
8	835.1	145	833	133

(α)

Band number	S2A		S2B	
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
5	703.9	19	703.8	20
6	740.2	18	739.1	18
7	782.5	28	779.7	28
8a	864.8	33	864	32
11	1613.7	143	1610.4	141
12	2202.4	242	2185.7	238

(β)

2.8 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων

Με την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων εξετάζεται η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής (Y) με μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές (X). Συγκεκριμένα εξετάζεται πως οι μεταβολές της ανεξάρτητης μεταβλητής επηρεάζουν την εξαρτημένη. Στην παρούσα έρευνα η ανεξάρτητες μεταβλητές είναι τα φασματικά κανάλια και εξαρτημένες μεταβλητές οι τιμές των φυσικοχημικών παραμέτρων, σε όλα τα βάθη. Χρησιμοποιήθηκε από μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή, πραγματοποιώντας απλή παλινδρόμηση για μοντελοποίηση των σχέσεων, εξετάζοντας και την προσαρμογή τους με τον συντελεστή προσδιορισμού (R^2).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Δορυφορικές μετρήσεις και μετρήσεις δειγματοληψίας

Στους Πίνακες 3.1 - 3.4 δίνονται οι τιμές ανάκλασης από τις δορυφορικές εικόνες, καθώς και οι τιμές από τις επίγειες μετρήσεις θρεπτικών αλάτων (αμμωνιακά, νιτρώδη, νιτρικά, φωσφορικά και πυριτικά) στα 0, 5, 10 και 20 m, αντίστοιχα.

Τα σημεία δειγματοληψίας και των δυο περιοχών έρευνας, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά σε ιχθυοκλωβούς παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα και στους τέσσερις Πίνακες. Για την περιοχή Νηές είναι τα σημεία S2, S4 και S7 και για την περιοχή της Μηλίνας είναι τα S2, S3, S4 και S5.

Η ελάχιστη τιμή ανάκλασης σε όλα τα βάθη καταγράφηκε κατά τη φθινοπωρινή περίοδο στην περιοχή της Μηλίνας στον σταθμό S7 από το κανάλι B12 (0,013) ενώ η μέγιστη καταγράφηκε κατά τη θερινή περίοδο στην ίδια περιοχή στον σταθμό S4 από το κανάλι B8 (0,075).

3.2 Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας

Οι φασματικές υπογραφές (ανακλάσεις) που προέκυψαν από τα ομαδοποιημένα κανάλια έγιναν με σκοπό να καλυφθεί όλη η φασματική ζώνη, χωρίς να υπάρχει επικάλυψη κάποιου καναλιού σε κάποιο άλλο. Δηλαδή στην πρώτη ομάδα (Σχ. 3.1 & 3.2), για το ορατό φάσμα επιλέχθηκαν τα κανάλια B2, B3 και B4, για το κοντινό υπέρυθρο το B8 και για το μέσο υπέρυθρο τα κανάλια B11 και B12. Στη δεύτερη ομάδα (Σχ. 3.3 & 3.4), επιλέχθηκαν τα κανάλια B2, B3 και B4 για το κοντινό υπέρυθρο, τα B5, B6, B7 και B8A που αντικατέστησαν το B8 για το κοντινό υπέρυθρο και τα B11 και B12 για το μέσο υπέρυθρο. Το φασματικό κανάλι B8 αν και δεν ταυτίζεται απόλυτα

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικές τιμές ανάκλασης και θρεπτικών αλάτων (σε μM) από όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας στις Νηές (S1-S11) (α) και στη Μηλίνα (S1-S8) (β) στην επιφάνεια του νερού (0 m). Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι τιμές των δεδομένων στους σταθμούς δειγματοληψίας των ιχθυοκλωβών.

0m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Ανοιξη Νηές	S1	0,029	0,0302	0,0219	0,0321	0,0389	0,0427	0,0281	0,042	0,033	0,0261	0,530	0,024	0,023	1,768	1,038	2,321
	S2	0,0297	0,0252	0,0238	0,0252	0,0311	0,0343	0,0306	0,0347	0,0258	0,0214	3,918	0,017	0,046	1,955	1,143	5,890
	S3	0,0296	0,0282	0,0199	0,0293	0,0273	0,0388	0,0288	0,0306	0,0264	0,0369	0,530	0,026	0,013	1,684	1,230	2,240
	S4	0,0393	0,0391	0,0356	0,0439	0,05	0,0536	0,0418	0,0591	0,0475	0,0347	2,956	0,015	0,025	1,652	1,150	4,622
	S5	0,0303	0,0251	0,0237	0,0245	0,0291	0,0303	0,0305	0,0301	0,0264	0,0207	1,914	0,030	0,019	2,090	0,928	4,035
	S6	0,025	0,0212	0,0177	0,0188	0,0234	0,0254	0,0221	0,0249	0,0175	0,015	0,530	0,024	0,025	1,829	1,145	2,383
	S7	0,0299	0,0266	0,0268	0,0296	0,0342	0,0356	0,035	0,0388	0,0295	0,0244	1,828	0,013	0,019	1,829	1,033	3,670
	S8	0,0336	0,029	0,0265	0,0269	0,0326	0,0337	0,0319	0,0334	0,0246	0,0214	0,395	0,017	0,023	1,989	1,085	2,401
	S9	0,0303	0,025	0,0234	0,0239	0,0274	0,0273	0,0268	0,0289	0,0224	0,02	0,346	0,015	0,024	1,648	0,958	2,010
	S10	0,0291	0,0226	0,0206	0,0227	0,0291	0,0278	0,0242	0,0275	0,0219	0,0203	0,290	0,024	0,019	1,626	1,136	1,939
	S11	0,0334	0,0284	0,0289	0,0295	0,0321	0,0337	0,0293	0,0327	0,0293	0,0254	0,303	0,026	0,025	1,679	0,968	2,009
Καλοκαίρι Νηές	S1	0,0386	0,0309	0,0249	0,0269	0,0401	0,0499	0,0465	0,0525	0,0357	0,0267	0,723	0,026	0,028	1,753	1,156	2,503
	S2	0,0314	0,0202	0,0222	0,0248	0,0358	0,0409	0,0352	0,0448	0,0322	0,0225	3,353	0,022	0,054	2,113	1,185	5,488
	S3	0,0338	0,0262	0,0233	0,0245	0,0347	0,0397	0,039	0,047	0,0401	0,0321	0,499	0,022	0,011	1,781	1,290	2,301
	S4	0,0384	0,0323	0,0346	0,0389	0,0494	0,0561	0,0492	0,06	0,0455	0,032	1,589	0,013	0,018	1,824	1,236	3,427
	S5	0,0308	0,0201	0,0211	0,0224	0,0302	0,0334	0,0325	0,0357	0,0258	0,0197	1,525	0,030	0,013	2,116	1,033	3,671
	S6	0,0314	0,0193	0,0207	0,0224	0,0299	0,0356	0,0324	0,0379	0,027	0,0202	0,091	0,015	0,018	1,776	1,156	1,882
	S7	0,0315	0,023	0,0244	0,0321	0,0395	0,0417	0,0366	0,0438	0,0352	0,026	1,926	0,013	0,013	1,890	0,983	3,829
	S8	0,0327	0,0221	0,0204	0,0217	0,0297	0,0297	0,0296	0,0341	0,0235	0,0199	0,178	0,015	0,018	2,071	1,018	2,264
	S9	0,0321	0,0188	0,0196	0,0217	0,0276	0,0301	0,0286	0,0315	0,0243	0,0193	0,241	0,020	0,018	1,955	1,075	2,215
	S10	0,0318	0,0193	0,0194	0,0211	0,0276	0,0307	0,0286	0,0303	0,0228	0,0185	0,194	0,022	0,013	1,803	1,236	2,019
	S11	0,0175	0,0175	0,0184	0,0186	0,0221	0,0224	0,0215	0,0232	0,0184	0,0158	0,214	0,030	0,031	1,592	1,068	1,836

(α)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.1: Συνέχεια.

0m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Καλοκαίρι Μηλίνα	S1	0,0312	0,0179	0,0157	0,0171	0,0203	0,0222	0,0211	0,0233	0,0159	0,0167	0,100	2,152	0,185	0,007	0,579	2,259
	S2	0,0329	0,0229	0,0216	0,028	0,0309	0,0355	0,0273	0,036	0,014	0,0248	1,229	2,253	0,174	0,008	0,193	3,490
	S3	0,0323	0,0241	0,0268	0,0279	0,0446	0,0387	0,0393	0,0451	0,0147	0,0355	2,922	2,440	0,206	0,029	0,320	5,391
	S4	0,0551	0,0518	0,0607	0,0332	0,0434	0,0446	0,0747	0,0502	0,0153	0,0358	2,822	2,434	0,059	0,023	0,468	5,279
	S5	0,0305	0,0184	0,0157	0,0167	0,0228	0,0239	0,0228	0,0245	0,0131	0,0168	0,206	2,440	0,074	0,013	0,388	2,659
	S6	0,029	0,0168	0,015	0,0159	0,0204	0,0215	0,0205	0,0204	0,0122	0,016	0,341	1,818	0,090	0,005	0,595	2,163
	S7	0,0285	0,0152	0,014	0,0148	0,0206	0,0215	0,0188	0,0197	0,0116	0,0152	0,121	2,440	0,050	0,010	0,594	2,571
	S8	0,0327	0,0177	0,0142	0,0149	0,0195	0,0201	0,0191	0,0198	0,0109	0,0149	0,159	2,440	0,051	0,003	0,924	2,602
Φθινόπωρο Μηλίνα	S1	0,034	0,0207	0,0159	0,0139	0,0157	0,0166	0,0161	0,0181	0,016	0,0135	0,026	2,440	0,246	0,026	0,467	2,492
	S2	0,0372	0,0244	0,0215	0,0257	0,0315	0,0363	0,0264	0,0386	0,0308	0,0236	0,154	2,440	0,237	0,056	1,090	2,650
	S3	0,044	0,0339	0,0377	0,0334	0,0388	0,0426	0,0447	0,0443	0,0448	0,0348	1,463	2,440	0,201	0,012	0,747	3,914
	S4	0,0493	0,0424	0,0472	0,0322	0,036	0,0369	0,0587	0,038	0,0391	0,0312	0,572	2,440	0,200	0,025	0,525	3,037
	S5	0,0365	0,0225	0,017	0,0155	0,0171	0,0198	0,0197	0,019	0,0169	0,0143	0,150	2,440	0,197	0,043	0,188	2,633
	S6	0,0348	0,0208	0,0157	0,0151	0,0165	0,0192	0,0181	0,0185	0,0162	0,0125	0,146	2,440	0,051	0,007	0,647	2,593
	S7	0,0328	0,0177	0,015	0,014	0,0156	0,0172	0,0155	0,0169	0,0142	0,013	0,116	2,440	0,090	0,008	0,365	2,564
	S8	0,0368	0,0207	0,0153	0,0143	0,0156	0,0158	0,0157	0,0162	0,0147	0,0137	0,159	2,440	0,249	0,007	0,183	2,606

(β)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικές τιμές ανάκλασης και θρεπτικών αλάτων (σε μM) από όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας στις Νηές (S1-S11) (α) και στη Μηλίνα (S1-S8) (β) σε βάθος 5 m. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι τιμές των δεδομένων στους σταθμούς δειγματοληψίας των ιχθυοκλωβών.

5m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Ανοιξη Νηές	S1	0,029	0,0302	0,0219	0,0321	0,0389	0,0427	0,0281	0,042	0,033	0,0261	0,124	0,030	0,025	1,776	1,067	1,931
	S2	0,0297	0,0252	0,0238	0,0252	0,0311	0,0343	0,0306	0,0347	0,0258	0,0214	3,046	0,015	0,044	1,766	1,188	4,828
	S3	0,0296	0,0282	0,0199	0,0293	0,0273	0,0388	0,0288	0,0306	0,0264	0,0369	0,192	0,017	0,012	1,918	1,200	2,127
	S4	0,0393	0,0391	0,0356	0,0439	0,05	0,0536	0,0418	0,0591	0,0475	0,0347	1,052	0,011	0,018	1,524	1,306	2,587
	S5	0,0303	0,0251	0,0237	0,0245	0,0291	0,0303	0,0305	0,0301	0,0264	0,0207	0,453	0,028	0,020	1,969	0,972	2,451
	S6	0,025	0,0212	0,0177	0,0188	0,0234	0,0254	0,0221	0,0249	0,0175	0,015	0,223	0,017	0,020	1,524	1,285	1,765
	S7	0,0299	0,0266	0,0268	0,0296	0,0342	0,0356	0,035	0,0388	0,0295	0,0244	0,635	0,011	0,020	1,663	1,072	2,309
	S8	0,0336	0,029	0,0265	0,0269	0,0326	0,0337	0,0319	0,0334	0,0246	0,0214	0,145	0,022	0,017	2,113	1,032	2,280
	S9	0,0303	0,025	0,0234	0,0239	0,0274	0,0273	0,0268	0,0289	0,0224	0,02	0,231	0,026	0,022	1,505	0,894	1,762
	S10	0,0291	0,0226	0,0206	0,0227	0,0291	0,0278	0,0242	0,0275	0,0219	0,0203	0,232	0,022	0,017	1,776	1,200	2,029
	S11	0,0334	0,0284	0,0289	0,0295	0,0321	0,0337	0,0293	0,0327	0,0293	0,0254	0,130	0,024	0,022	1,650	0,908	1,804
Καλοκαίρι Νηές	S1	0,0386	0,0309	0,0249	0,0269	0,0401	0,0499	0,0465	0,0525	0,0357	0,0267	0,092	0,024	0,022	1,768	1,138	1,883
	S2	0,0314	0,0202	0,0222	0,0248	0,0358	0,0409	0,0352	0,0448	0,0322	0,0225	2,681	0,017	0,040	1,911	1,205	4,610
	S3	0,0338	0,0262	0,0233	0,0245	0,0347	0,0397	0,039	0,047	0,0401	0,0321	0,158	0,015	0,009	1,782	1,276	1,955
	S4	0,0384	0,0323	0,0346	0,0389	0,0494	0,0561	0,0492	0,06	0,0455	0,032	1,090	0,011	0,015	1,589	1,223	2,689
	S5	0,0308	0,0201	0,0211	0,0224	0,0302	0,0334	0,0325	0,0357	0,0258	0,0197	0,332	0,022	0,012	1,948	1,007	2,302
	S6	0,0314	0,0193	0,0207	0,0224	0,0299	0,0356	0,0324	0,0379	0,027	0,0202	0,066	0,013	0,016	1,587	1,186	1,666
	S7	0,0315	0,023	0,0244	0,0321	0,0395	0,0417	0,0366	0,0438	0,0352	0,026	0,935	0,009	0,015	1,732	1,020	2,676
	S8	0,0327	0,0221	0,0204	0,0217	0,0297	0,0297	0,0296	0,0341	0,0235	0,0199	0,107	0,017	0,015	2,087	1,050	2,211
	S9	0,0321	0,0188	0,0196	0,0217	0,0276	0,0301	0,0286	0,0315	0,0243	0,0193	0,216	0,022	0,025	1,589	1,027	1,826
	S10	0,0318	0,0193	0,0194	0,0211	0,0276	0,0307	0,0286	0,0303	0,0228	0,0185	0,148	0,002	0,013	1,653	1,183	1,804
	S11	0,0175	0,0175	0,0184	0,0186	0,0221	0,0224	0,0215	0,0232	0,0184	0,0158	0,146	0,017	0,019	1,797	1,108	1,960

(α)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.2: Συνέχεια.

5m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Καλοκαίρι Μηλίνα	S1	0,0312	0,0179	0,0157	0,0171	0,0203	0,0222	0,0211	0,0233	0,0159	0,0167	0,278	2,327	0,201	0,029	0,697	2,634
	S2	0,0329	0,0229	0,0216	0,028	0,0309	0,0355	0,0273	0,036	0,014	0,0248	0,872	2,440	0,159	0,014	0,697	3,325
	S3	0,0323	0,0241	0,0268	0,0279	0,0446	0,0387	0,0393	0,0451	0,0147	0,0355	0,903	2,436	0,146	0,027	0,708	3,366
	S4	0,0551	0,0518	0,0607	0,0332	0,0434	0,0446	0,0747	0,0502	0,0153	0,0358	0,287	2,320	0,064	0,015	0,206	2,622
	S5	0,0305	0,0184	0,0157	0,0167	0,0228	0,0239	0,0228	0,0245	0,0131	0,0168	0,161	2,431	0,050	0,012	0,197	2,604
	S6	0,029	0,0168	0,015	0,0159	0,0204	0,0215	0,0205	0,0204	0,0122	0,016	0,187	1,236	0,052	0,002	0,435	1,425
	S7	0,0285	0,0152	0,014	0,0148	0,0206	0,0215	0,0188	0,0197	0,0116	0,0152	0,308	2,440	0,054	0,002	0,561	2,751
	S8	0,0327	0,0177	0,0142	0,0149	0,0195	0,0201	0,0191	0,0198	0,0109	0,0149	0,568	2,433	0,048	0,007	0,513	3,008
Φθινόπωρο Μηλίνα	S1	0,034	0,0207	0,0159	0,0139	0,0157	0,0166	0,0161	0,0181	0,016	0,0135	0,264	2,440	0,261	0,046	0,717	2,749
	S2	0,0372	0,0244	0,0215	0,0257	0,0315	0,0363	0,0264	0,0386	0,0308	0,0236	0,192	2,440	0,193	0,058	0,583	2,691
	S3	0,044	0,0339	0,0377	0,0334	0,0388	0,0426	0,0447	0,0443	0,0448	0,0348	0,888	2,440	0,246	0,022	0,597	3,350
	S4	0,0493	0,0424	0,0472	0,0322	0,036	0,0369	0,0587	0,038	0,0391	0,0312	0,639	2,440	0,195	0,045	0,374	3,124
	S5	0,0365	0,0225	0,017	0,0155	0,0171	0,0198	0,0197	0,019	0,0169	0,0143	0,099	2,440	0,146	0,026	0,150	2,565
	S6	0,0348	0,0208	0,0157	0,0151	0,0165	0,0192	0,0181	0,0185	0,0162	0,0125	0,056	2,440	0,052	0,006	0,611	2,501
	S7	0,0328	0,0177	0,015	0,014	0,0156	0,0172	0,0155	0,0169	0,0142	0,013	0,099	2,440	0,096	0,005	0,824	2,544
	S8	0,0368	0,0207	0,0153	0,0143	0,0156	0,0158	0,0157	0,0162	0,0147	0,0137	0,152	2,423	0,225	0,006	0,420	2,581

(β)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικές τιμές ανάκλασης και θρεπτικών αλάτων (σε μM) από όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας στις Νηές (S2-S11) (α) και στη Μηλίνα (S1-S8) (β) σε βάθος 10 m. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι τιμές των δεδομένων στους σταθμούς δειγματοληψίας των ιχθυοκλωβών.

10m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Ανοιξη Νηές	S2	0,0297	0,0252	0,0238	0,0252	0,0311	0,0343	0,0306	0,0347	0,0258	0,0214	1,056	0,026	0,051	1,952	1,135	3,034
	S3	0,0296	0,0282	0,0199	0,0293	0,0273	0,0388	0,0288	0,0306	0,0264	0,0369	0,114	0,020	0,015	1,794	1,155	1,927
	S4	0,393	0,0391	0,0356	0,0439	0,05	0,0536	0,0418	0,0591	0,0475	0,0347	0,551	0,017	0,019	1,811	1,236	2,380
	S5	0,0303	0,0251	0,0237	0,0245	0,0291	0,0303	0,0305	0,0301	0,0264	0,0207	0,213	0,026	0,018	1,797	0,870	2,036
	S6	0,025	0,0212	0,0177	0,0188	0,0234	0,0254	0,0221	0,0249	0,0175	0,015	0,150	0,015	0,018	1,971	1,231	2,137
	S7	0,0299	0,0266	0,0268	0,0296	0,0342	0,0356	0,035	0,0388	0,0295	0,0244	0,291	0,011	0,023	1,842	1,140	2,144
	S8	0,0336	0,029	0,0265	0,0269	0,0326	0,0337	0,0319	0,0334	0,0246	0,0214	0,093	0,017	0,016	1,810	1,022	1,921
	S9	0,0303	0,025	0,0234	0,0239	0,0274	0,0273	0,0268	0,0289	0,0224	0,02	0,115	0,024	0,023	1,790	0,975	1,930
	S10	0,0291	0,0226	0,0206	0,0227	0,0291	0,0278	0,0242	0,0275	0,0219	0,0203	0,116	0,017	0,016	1,953	1,188	2,086
	S11	0,0334	0,0284	0,0289	0,0295	0,0321	0,0337	0,0293	0,0327	0,0293	0,0254	0,152	0,026	0,023	1,810	0,933	1,988
	S2	0,0314	0,0202	0,0222	0,0248	0,0358	0,0409	0,0352	0,0448	0,0322	0,0225	1,345	0,024	0,040	1,969	1,156	3,339
Καλοκαίρι Νηές	S3	0,0338	0,0262	0,0233	0,0245	0,0347	0,0397	0,039	0,047	0,0401	0,0321	0,138	0,013	0,008	1,779	1,173	1,930
	S4	0,0384	0,0323	0,0346	0,0389	0,0494	0,0561	0,0492	0,06	0,0455	0,032	0,432	0,011	0,017	1,802	1,185	2,245
	S5	0,0308	0,0201	0,0211	0,0224	0,0302	0,0334	0,0325	0,0357	0,0258	0,0197	0,246	0,017	0,011	1,776	0,968	2,039
	S6	0,0314	0,0193	0,0207	0,0224	0,0299	0,0356	0,0324	0,0379	0,027	0,0202	0,091	0,013	0,016	1,579	1,200	1,683
	S7	0,0315	0,023	0,0244	0,0321	0,0395	0,0417	0,0366	0,0438	0,0352	0,026	0,342	0,011	0,017	1,745	1,067	2,098
	S8	0,0327	0,0221	0,0204	0,0217	0,0297	0,0297	0,0296	0,0341	0,0235	0,0199	0,071	0,013	0,013	1,915	1,038	1,999
	S9	0,0321	0,0188	0,0196	0,0217	0,0276	0,0301	0,0286	0,0315	0,0243	0,0193	0,143	0,030	0,020	1,603	1,141	1,777
	S10	0,0318	0,0193	0,0194	0,0211	0,0276	0,0307	0,0286	0,0303	0,0228	0,0185	0,184	0,013	0,008	1,663	1,143	1,860
	S11	0,0175	0,0175	0,0184	0,0186	0,0221	0,0224	0,0215	0,0232	0,0184	0,0158	0,109	0,022	0,022	1,777	1,018	1,909

(α)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.3: Συνέχεια.

10m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Καλοκαίρι Μηλίνα	S1	0,0312	0,0179	0,0157	0,0171	0,0203	0,0222	0,0211	0,0233	0,0159	0,0167	0,376	2,402	0,179	0,011	0,422	2,789
	S2	0,0329	0,0229	0,0216	0,028	0,0309	0,0355	0,0273	0,036	0,014	0,0248	0,492	2,440	0,150	0,029	0,751	2,961
	S3	0,0323	0,0241	0,0268	0,0279	0,0446	0,0387	0,0393	0,0451	0,0147	0,0355	0,645	2,440	0,173	0,028	0,377	3,113
	S4	0,0551	0,0518	0,0607	0,0332	0,0434	0,0446	0,0747	0,0502	0,0153	0,0358	0,182	2,344	0,078	0,016	0,502	2,541
	S5	0,0305	0,0184	0,0157	0,0167	0,0228	0,0239	0,0228	0,0245	0,0131	0,0168	0,096	2,281	0,056	0,010	0,311	2,387
	S6	0,029	0,0168	0,015	0,0159	0,0204	0,0215	0,0205	0,0204	0,0122	0,016	0,136	1,839	0,059	0,002	0,277	1,978
	S7	0,0285	0,0152	0,014	0,0148	0,0206	0,0215	0,0188	0,0197	0,0116	0,0152	0,148	2,440	0,039	0,010	0,781	2,598
	S8	0,0327	0,0177	0,0142	0,0149	0,0195	0,0201	0,0191	0,0198	0,0109	0,0149	0,459	2,439	0,059	0,002	0,776	2,899
φθινόπωρο Μηλίνα	S1	0,034	0,0207	0,0159	0,0139	0,0157	0,0166	0,0161	0,0181	0,016	0,0135	0,055	2,440	0,263	0,020	0,599	2,515
	S2	0,0372	0,0244	0,0215	0,0257	0,0315	0,0363	0,0264	0,0386	0,0308	0,0236	0,189	2,440	0,267	0,057	0,697	2,686
	S3	0,044	0,0339	0,0377	0,0334	0,0388	0,0426	0,0447	0,0443	0,0448	0,0348	0,433	2,440	0,237	0,017	0,865	2,889
	S4	0,0493	0,0424	0,0472	0,0322	0,036	0,0369	0,0587	0,038	0,0391	0,0312	0,344	2,440	0,200	0,030	0,216	2,814
	S5	0,0365	0,0225	0,017	0,0155	0,0171	0,0198	0,0197	0,019	0,0169	0,0143	0,326	2,440	0,201	0,019	0,161	2,784
	S6	0,0348	0,0208	0,0157	0,0151	0,0165	0,0192	0,0181	0,0185	0,0162	0,0125	0,007	2,440	0,046	0,009	0,972	2,456
	S7	0,0328	0,0177	0,015	0,014	0,0156	0,0172	0,0155	0,0169	0,0142	0,013	0,117	2,440	0,097	0,004	0,379	2,561
	S8	0,0368	0,0207	0,0153	0,0143	0,0156	0,0158	0,0157	0,0162	0,0147	0,0137	0,160	2,440	0,250	0,010	0,211	2,611

(β)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

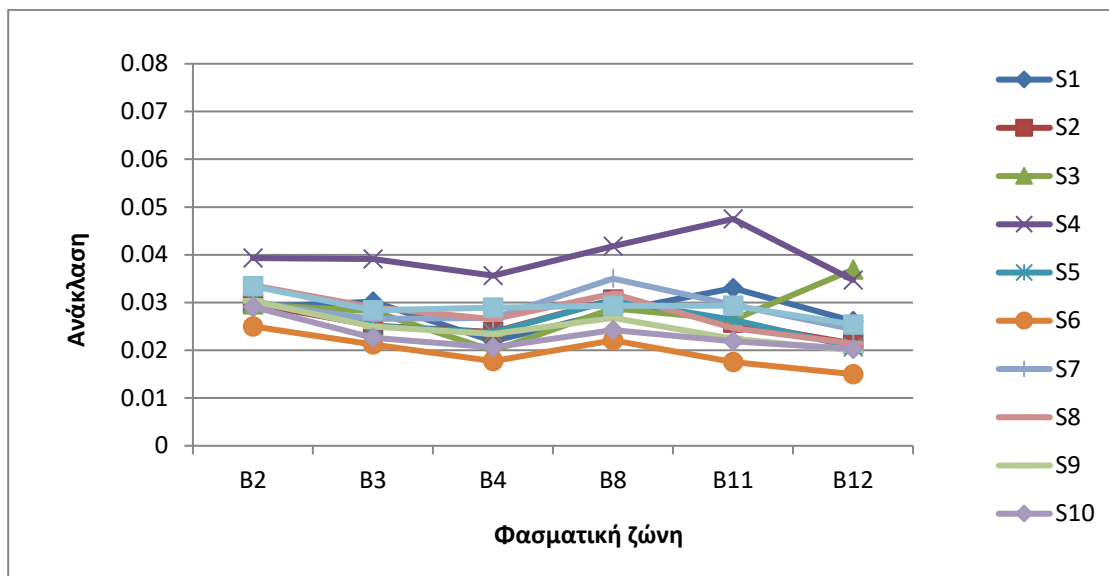
(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικές τιμές ανάκλασης και θρεπτικών αλάτων (σε μM) από όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας στις Νηές (S2-S11) (α) και στη Μηλίνα (S1-S7) (β) σε βάθος 20 m. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι τιμές των δεδομένων στους σταθμούς δειγματοληψίας των ιχθυοκλωβών.

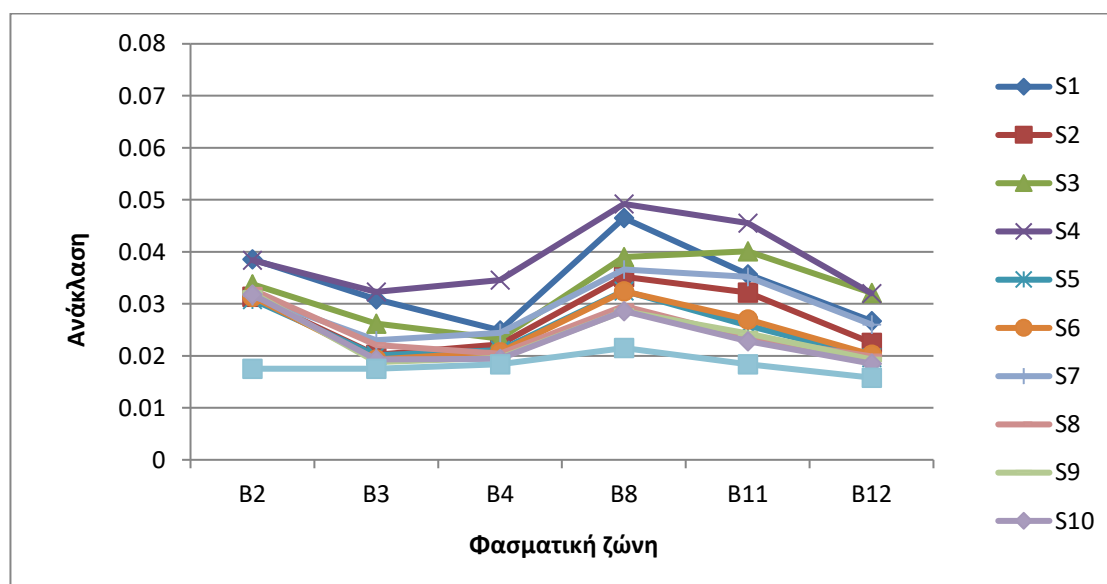
20m		B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B11	B12	NH ₄	NO ₂	PO ₄	NO ₃	SiO ₂	TIN
Ανοιξη Νηές	S2	0,0297	0,0252	0,0238	0,0252	0,0311	0,0343	0,0306	0,0347	0,0258	0,0214	0,218	0,028	0,048	1,776	1,145	2,022
	S4	0,393	0,0391	0,0356	0,0439	0,05	0,0536	0,0418	0,0591	0,0475	0,0347	0,223	0,020	0,017	1,953	1,201	2,196
	S5	0,0303	0,0251	0,0237	0,0245	0,0291	0,0303	0,0305	0,0301	0,0264	0,0207	0,119	0,017	0,017	1,632	0,982	1,769
	S6	0,025	0,0212	0,0177	0,0188	0,0234	0,0254	0,0221	0,0249	0,0175	0,015	0,109	0,014	0,018	1,952	1,225	2,075
	S7	0,0299	0,0266	0,0268	0,0296	0,0342	0,0356	0,035	0,0388	0,0295	0,0244	0,280	0,013	0,018	1,523	1,012	1,816
	S9	0,0303	0,025	0,0234	0,0239	0,0274	0,0273	0,0268	0,0289	0,0224	0,02	0,157	0,028	0,018	1,935	0,972	2,121
	S10	0,0291	0,0226	0,0206	0,0227	0,0291	0,0278	0,0242	0,0275	0,0219	0,0203	0,121	0,020	0,017	1,808	1,155	1,949
	S11	0,0334	0,0284	0,0289	0,0295	0,0321	0,0337	0,0293	0,0327	0,0293	0,0254	0,119	0,017	0,017	2,006	0,955	2,143
	S2	0,0314	0,0202	0,0222	0,0248	0,0358	0,0409	0,0352	0,0448	0,0322	0,0225	0,188	0,015	0,027	1,797	1,161	2,000
	S4	0,0384	0,0323	0,0346	0,0389	0,0494	0,0561	0,0492	0,06	0,0455	0,032	0,187	0,013	0,013	1,808	1,161	2,008
	S5	0,0308	0,0201	0,0211	0,0224	0,0302	0,0334	0,0325	0,0357	0,0258	0,0197	0,157	0,017	0,012	1,629	0,977	1,804
Καλοκαίρι Νηές	S6	0,0314	0,0193	0,0207	0,0224	0,0299	0,0356	0,0324	0,0379	0,027	0,0202	0,046	0,011	0,018	1,648	1,195	1,705
	S7	0,0315	0,023	0,0244	0,0321	0,0395	0,0417	0,0366	0,0438	0,0352	0,026	0,324	0,011	0,012	1,610	1,045	1,944
	S9	0,0321	0,0188	0,0196	0,0217	0,0276	0,0301	0,0286	0,0315	0,0243	0,0193	0,107	0,026	0,019	1,635	0,992	1,768
	S10	0,0318	0,0193	0,0194	0,0211	0,0276	0,0307	0,0286	0,0303	0,0228	0,0185	0,153	0,015	0,009	1,792	1,163	1,961
	S11	0,0175	0,0175	0,0184	0,0186	0,0221	0,0224	0,0215	0,0232	0,0184	0,0158	0,125	0,013	0,015	1,845	1,121	1,983
	S1	0,0312	0,0179	0,0157	0,0171	0,0203	0,0222	0,0211	0,0233	0,0159	0,0167	0,306	2,182	0,178	0,011	0,420	2,498
	S2	0,0329	0,0229	0,0216	0,028	0,0309	0,0355	0,0273	0,036	0,014	0,0248	0,106	2,440	0,154	0,028	0,459	2,574
Καλοκαίρι Μηλίνα	S6	0,029	0,0168	0,015	0,0159	0,0204	0,0215	0,0205	0,0204	0,0122	0,016	0,253	1,653	0,096	0,003	0,359	1,908
	S7	0,0285	0,0152	0,014	0,0148	0,0206	0,0215	0,0188	0,0197	0,0116	0,0152	0,121	2,440	0,050	0,019	0,606	2,581
	S1	0,034	0,0207	0,0159	0,0139	0,0157	0,0166	0,0161	0,0181	0,016	0,0135	0,043	2,440	0,248	0,027	0,427	2,510
	S2	0,0372	0,0244	0,0215	0,0257	0,0315	0,0363	0,0264	0,0386	0,0308	0,0236	0,158	2,440	0,188	0,055	0,797	2,653
	S6	0,0348	0,0208	0,0157	0,0151	0,0165	0,0192	0,0181	0,0185	0,0162	0,0125	0,046	2,435	0,043	0,013	1,035	2,494
	S7	0,0328	0,0177	0,015	0,014	0,0156	0,0172	0,0155	0,0169	0,0142	0,013	0,130	2,440	0,087	0,003	0,422	2,572
	S7	0,0328	0,0177	0,015	0,014	0,0156	0,0172	0,0155	0,0169	0,0142	0,013	0,130	2,440	0,087	0,003	0,422	2,572

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

(B2 – B12 : Κανάλια Δορυφόρου).

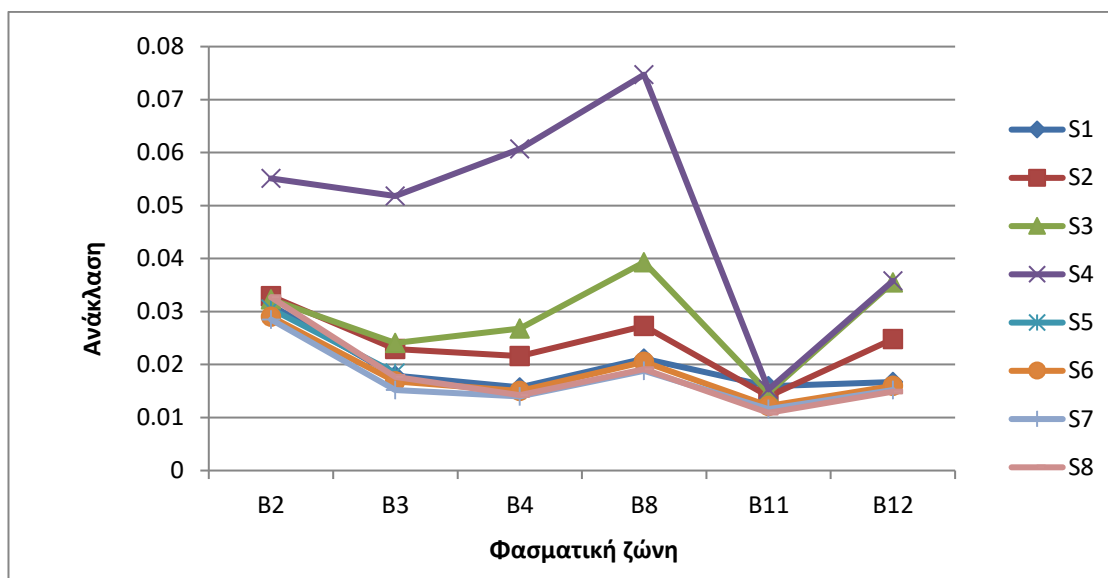


(α)

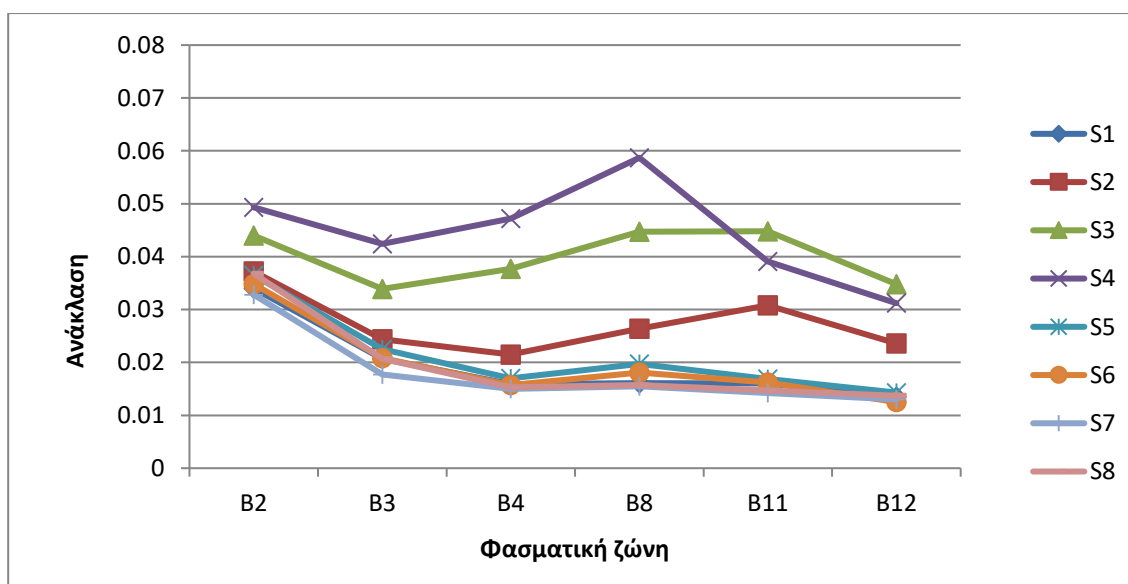


(β)

Σχήμα 3.1: Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας από τα κανάλια B2, B3, B4, B8, B11 και B12 στις Νηές την άνοιξη (α) και το καλοκαίρι (β).

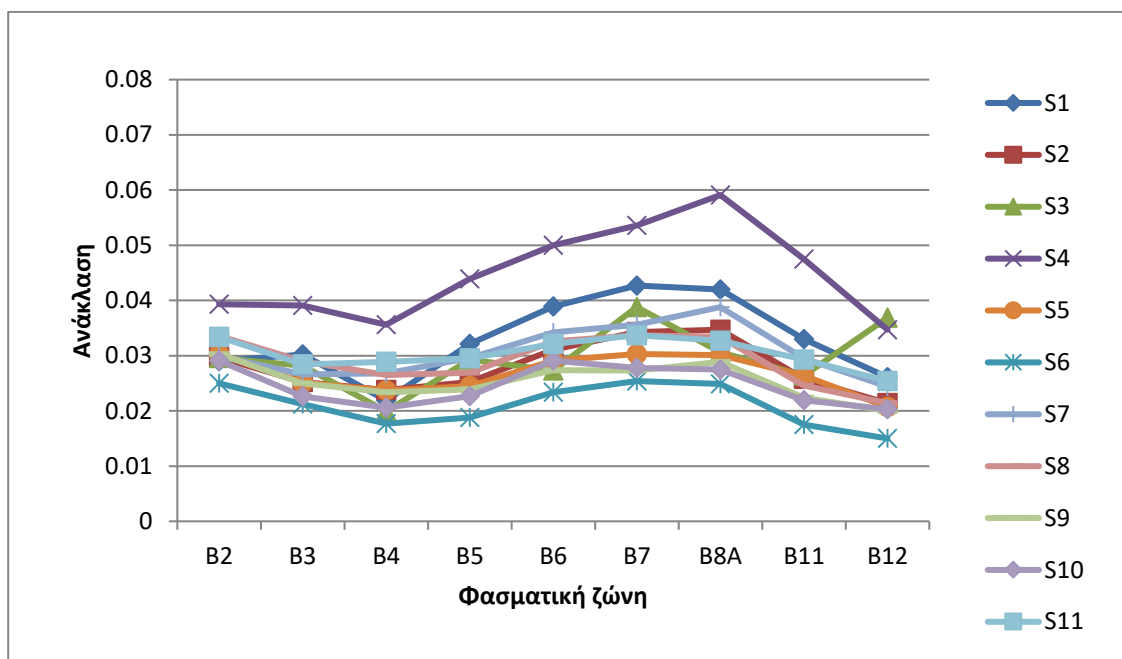


(α)

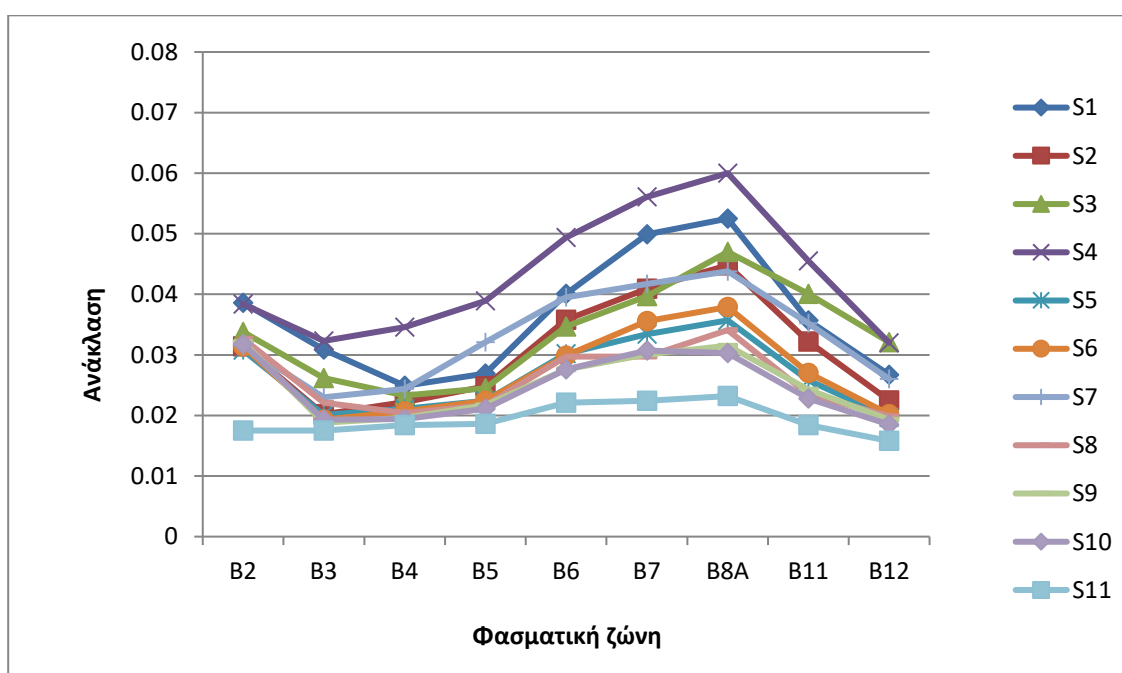


(β)

Σχήμα 3.2: Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας από τα κανάλια B2, B3, B4, B8, B11 και B12 στη Μηλίνα το καλοκαίρι (α) και το φθινόπωρο (β).

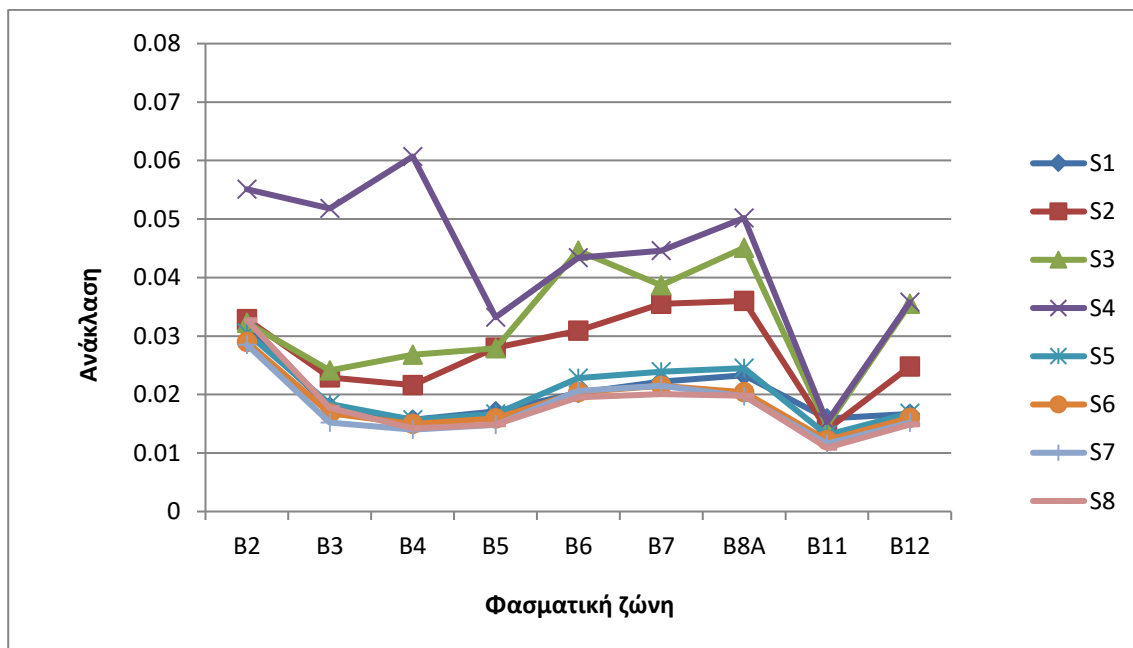


(α)

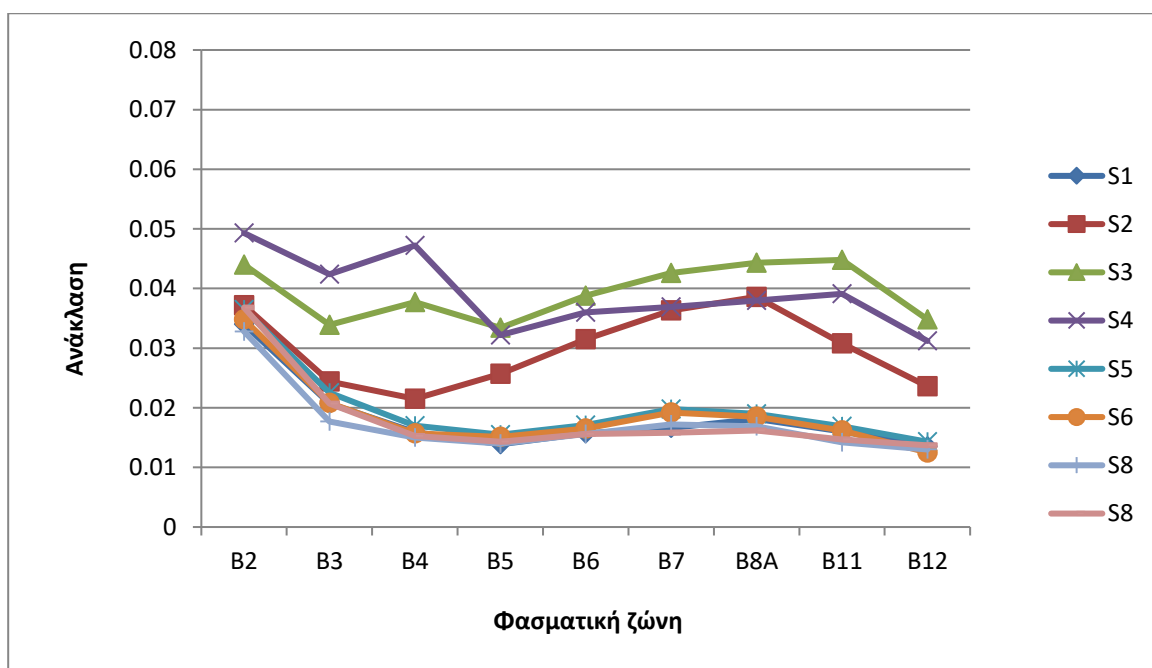


(β)

Σχήμα 3.3: Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας από τα κανάλια B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 και B12 στις Νηές την άνοιξη (α) και το καλοκαίρι (β).



(α)



(β)

Σχήμα 3.4: Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας από τα κανάλια B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 και B12 στη Μηλίνα το καλοκαίρι (α) και το φθινόπωρο (β).

με το B5, B6 και B7, χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτικό του κοντινού υπέρυθρου (<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>).

Στα Σχήματα 3.1 & 3.2 δίνονται οι φασματικές υπογραφές (ανακλάσεις) και των δύο περιοχών σε κάθε εποχή μέτρησης από τα κανάλια B2, B3, B4, B8, B11 και B12. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.1, παρατηρούμε τις διακυμάνσεις όλων των φασματικών υπογραφών από τους 8 σταθμούς δειγματοληψίας, στις Νηές την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ στο Σχήμα 3.2 παρατηρούμε τις φασματικές υπογραφές στην Μηλίνα το καλοκαίρι και το φθινόπωρο.

Οι μέγιστες τιμές ανάκλασης που παρουσιάστηκαν για τις Νηές, ήταν στο σημείο S4 και για τις δύο εποχές με αρκετά υψηλότερη διαφοροποίηση από τα άλλα σημεία, καθώς το σημείο αυτό βρίσκεται κοντά σε ιχθυοκλωβούς (Σχ. 3.1). Στη συνέχεια παρατηρούμε τις φασματικές υπογραφές της περιοχής Μηλίνας κατά τις περιόδους καλοκαίρι και φθινόπωρο. Σε αυτή την περιοχή έρευνας παρουσιάστηκαν επίσης αρκετά υψηλές ανακλάσεις από σημεία που βρίσκονται επίσης κοντά σε ιχθυοκλωβούς τα S3 και S4 (Σχ. 3.2).

Στα Σχήματα 3.3 & 3.4 δίνονται οι φασματικές υπογραφές και των δύο περιοχών έρευνας σε κάθε εποχή μέτρησης από τα κανάλια B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 και B12. Στους σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς για την περιοχή Νηές σημειώθηκαν οι υψηλότερες τιμές ανάκλασης στο S4 και για την περιοχή της Μηλίνα στα S2, S3 και S4, αντίστοιχα.

3.3 Συσχετίσεις και των δύο μετρήσεων

Στον Πίνακα 3.5 δίνεται ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) των θρεπτικών αλάτων και του ολικού ανόργανου αζώτου με τις αντίστοιχες φασματικές τιμές στα 0, 5, 10

Πίνακας 3.5: Συντελεστής συσχέτισης τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης θρεπτικών στα 0 m (α), στα 5 m (β), στα 10 m (γ) και στα 20 m (δ).

0 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	0,22	0,43	0,50	0,57	0,64	0,58	0,54	0,61	0,34	0,53
NO ₂	0,40	-0,03	-0,01	-0,38	-0,38	-0,43	-0,13	-0,39	-0,48	-0,18
PO ₄	0,35	0,01	0,00	-0,20	-0,24	-0,28	-0,11	-0,23	-0,21	-0,06
NO ₃	-0,36	0,03	0,02	0,37	0,39	0,43	0,15	0,40	0,49	0,17
SiO ₂	-0,28	0,06	0,03	0,37	0,39	0,48	0,17	0,43	0,57	0,24
TIN	0,34	0,41	0,50	0,46	0,54	0,46	0,51	0,50	0,22	0,46

(α)

5 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	0,03	0,11	0,20	0,33	0,37	0,35	0,23	0,36	0,29	0,24
NO ₂	0,40	-0,03	-0,01	-0,36	-0,37	-0,42	-0,13	-0,38	-0,47	-0,18
PO ₄	0,39	0,05	0,05	-0,18	-0,23	-0,27	-0,08	-0,23	-0,15	-0,05
NO ₃	-0,38	0,04	0,01	0,36	0,37	0,42	0,14	0,38	0,48	0,19
SiO ₂	-0,43	-0,06	-0,09	0,34	0,36	0,43	0,04	0,40	0,49	0,20
TIN	0,22	0,11	0,18	0,14	0,17	0,14	0,16	0,16	0,07	0,16

(β)

10 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	0,17	0,11	0,17	0,32	0,40	0,40	0,25	0,41	0,27	0,27
NO ₂	-0,10	-0,01	-0,02	-0,35	-0,35	-0,40	-0,12	-0,36	-0,46	-0,16
PO ₄	-0,07	0,09	0,05	-0,15	-0,19	-0,22	-0,06	-0,18	-0,12	-0,02
NO ₃	0,11	0,02	0,03	0,37	0,36	0,41	0,12	0,37	0,47	0,17
SiO ₂	0,16	0,00	0,00	0,37	0,36	0,45	0,10	0,41	0,48	0,20
TIN	0,04	0,10	0,12	-0,01	0,04	0,00	0,08	0,04	-0,11	0,08

(γ)

20 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	0,18	0,22	0,30	0,39	0,40	0,36	0,39	0,37	0,34	0,40
NO ₂	-0,13	-0,38	-0,57	-0,51	-0,57	-0,52	-0,65	-0,51	-0,58	-0,45
PO ₄	-0,11	-0,22	-0,40	-0,34	-0,41	-0,36	-0,48	-0,33	-0,39	-0,27
NO ₃	0,18	0,44	0,61	0,53	0,58	0,53	0,63	0,52	0,60	0,47
SiO ₂	0,20	0,41	0,53	0,48	0,55	0,53	0,59	0,52	0,61	0,40
TIN	0,06	-0,09	-0,32	-0,26	-0,36	-0,32	-0,50	-0,31	-0,36	-0,23

(δ)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

και 20 m βάθος. Παρατηρήθηκε ότι στα 0 m σημειώθηκαν υψηλότερες τιμές στα αμμωνιακά στα κανάλια B6 και B8α με τιμές συσχέτισης 0,64 και 0,61, αντίστοιχα. Στα 5 m υψηλότερες τιμές συσχέτισης είχαν τα νιτρικά (0,48) και τα πυριτικά (0,49) στο ίδιο φασματικό κανάλι (B11). Στα 10 m υψηλότερες τιμές συσχέτισης εμφανίστηκαν στο φασματικό κανάλι B11 με αρνητική συσχέτιση στα νιτρώδη (-0,46) και θετική στα πυριτικά (0,48). Επίσης, στα 20 m παρατηρήθηκε ότι υψηλότερες τιμές συσχέτισης καταγράφηκαν στα νιτρικά (0,63) στο φασματικό κανάλι B8 και στα νιτρικά και στα πυριτικά (0,61) στο φασματικό κανάλι B4 και B11, αντίστοιχα. Επειδή όμως οι ανακλάσεις των σημείων δειγματοληψίας επηρεάζονται από τους ιχθυοκλωβούς, αφαιρέθηκαν οι αντίστοιχοι σταθμοί δειγματοληψίας και οι μετρήσεις αυτών που βρίσκονται κοντά τους.

3.4 Συσχετίσεις των σημείων που δε βρίσκονται κοντά σε κλωβούς

Στον Πίνακα 3.6, δίνεται ο συντελεστής συσχέτισης των παραμέτρων του Πίνακα 3.5 αφαιρώντας τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.

Παρατηρήθηκε ότι στα 0 m σημειώθηκαν υψηλότερες τιμές συσχέτισης στα νιτρώδη (-0,84) και στα νιτρικά (0,83) στο φασματικό κανάλι B6. Στα 5 m υψηλότερες τιμές συσχέτισης είχαν τα νιτρικά με 0,84 και 0,83 στο φασματικό κανάλι το B6 και B5, αντίστοιχα. Στα 10 m υψηλότερες τιμές συσχέτισης εμφανίστηκαν στο φασματικό κανάλι B6 και στο B5 για τα νιτρικά με 0,86 και 0,84, αντίστοιχα. Επίσης, στα 20 m βρέθηκε ότι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν στα νιτρικά με 0,85 και νιτρώδη με αρνητικό αριθμό συσχέτισης -0,88 στο ίδιο φασματικό κανάλι B6.

Πίνακας 3.6: Συντελεστής συσχέτισης τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης θρεπτικών στα 0 m (α), στα 5 m (β), στα 10 m (γ) και στα 20 m (δ), χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.

0 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	-0,07	0,35	0,43	0,42	0,43	0,41	0,47	0,39	0,42	0,32
NO ₂	0,28	-0,55	-0,80	-0,83	-0,82	-0,77	-0,75	-0,75	-0,77	-0,65
PO ₄	0,34	-0,29	-0,53	-0,62	-0,68	-0,63	-0,60	-0,59	-0,51	-0,51
NO ₃	-0,22	0,55	0,80	0,80	0,82	0,75	0,76	0,75	0,77	0,61
SiO ₂	-0,29	0,43	0,63	0,72	0,77	0,75	0,72	0,73	0,69	0,65
TIN	0,20	0,01	-0,03	-0,10	-0,06	-0,05	0,04	-0,05	-0,03	-0,12

(α)

5 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	-0,17	-0,26	-0,20	-0,17	-0,15	-0,21	-0,16	-0,23	-0,28	-0,13
NO ₂	0,29	-0,54	-0,78	-0,81	-0,82	-0,76	-0,75	-0,74	-0,75	-0,64
PO ₄	0,33	-0,30	-0,53	-0,61	-0,66	-0,62	-0,60	-0,57	-0,49	-0,49
NO ₃	-0,23	0,60	0,81	0,83	0,83	0,77	0,76	0,75	0,78	0,66
SiO ₂	-0,30	0,42	0,60	0,67	0,69	0,68	0,64	0,68	0,70	0,59
TIN	0,27	-0,29	-0,51	-0,54	-0,55	-0,53	-0,50	-0,52	-0,51	-0,41

(β)

10 m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	0,11	-0,20	-0,20	-0,18	-0,15	-0,14	-0,10	-0,14	-0,20	-0,12
NO ₂	0,35	-0,53	-0,79	-0,85	-0,87	-0,83	-0,82	-0,80	-0,78	-0,62
PO ₄	0,43	-0,22	-0,50	-0,62	-0,72	-0,69	-0,65	-0,63	-0,47	-0,47
NO ₃	-0,35	0,57	0,79	0,84	0,86	0,80	0,79	0,78	0,77	0,61
SiO ₂	-0,33	0,37	0,55	0,65	0,71	0,71	0,65	0,67	0,64	0,51
TIN	0,33	-0,38	-0,67	-0,74	-0,78	-0,76	-0,75	-0,74	-0,69	-0,55

(γ)

20m	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8α	B11	B12
NH ₄	-0,14	-0,23	-0,14	-0,04	-0,02	-0,07	-0,03	-0,08	-0,25	0,07
NO ₂	0,34	-0,48	-0,76	-0,83	-0,88	-0,83	-0,83	-0,83	-0,80	-0,74
PO ₄	0,29	-0,27	-0,52	-0,61	-0,67	-0,66	-0,62	-0,58	-0,54	-0,49
NO ₃	-0,33	0,55	0,78	0,83	0,85	0,79	0,77	0,78	0,80	0,72
SiO ₂	-0,28	0,39	0,54	0,60	0,65	0,66	0,62	0,63	0,65	0,43
TIN	0,25	-0,23	-0,54	-0,65	-0,78	-0,78	-0,82	-0,79	-0,69	-0,62

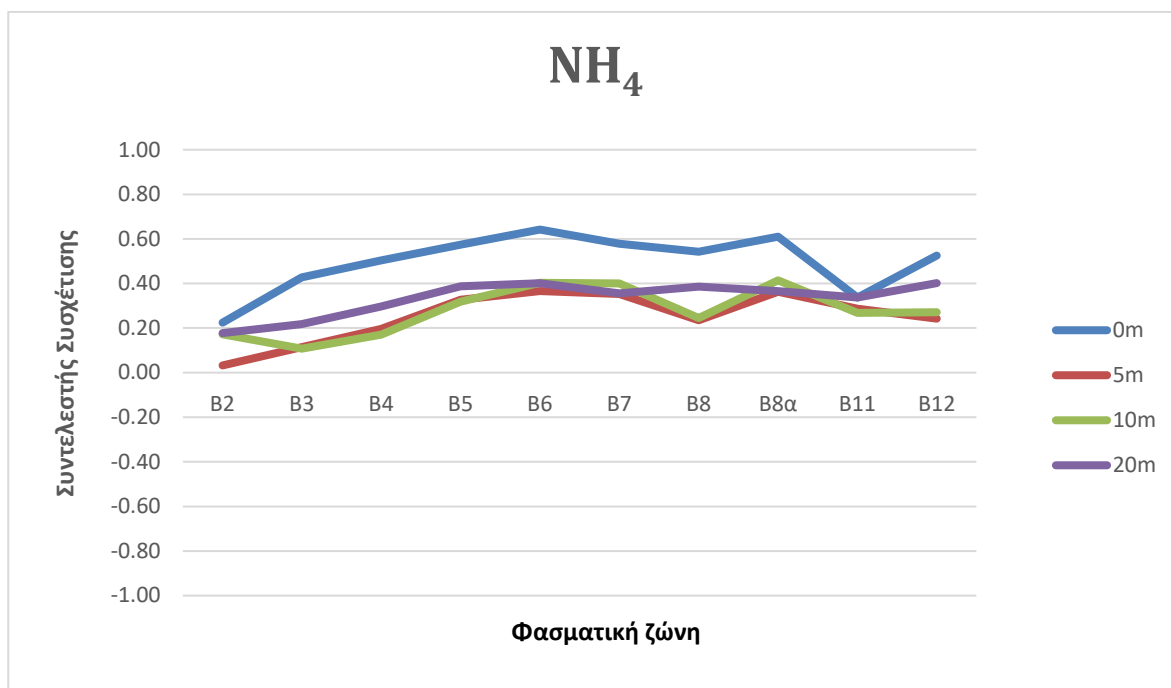
(δ)

(TIN: Total Inorganic Nitrogen, Ολικό Ανόργανο Άζωτο).

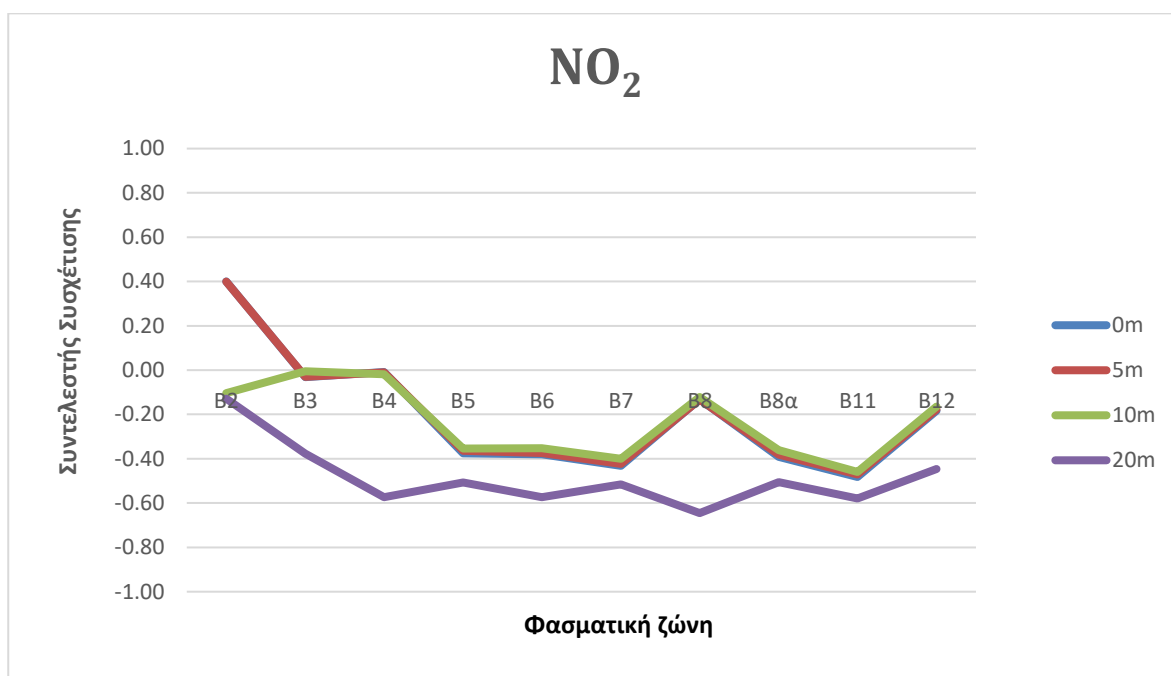
3.5 Συσχέτιση ανακλάσεων με μετρήσεις των θρεπτικών

Στα Σχήματα 3.5 έως 3.10 αποτυπώνεται ο συντελεστής συσχέτισης των θρεπτικών αλάτων σε όλα τα βάθη και σε κάθε φασματικό κανάλι. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται οι συντελεστές συσχέτισης των αμμωνιακών, όπου στα 0 m υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τα υπόλοιπα βάθη. Στο Σχήμα 3.6 παρατηρείται αρκετά κοντινή συσχέτιση των νιτρικών σε όλα τα βάθη εκτός των 20 m, όπου εμφανίζει αρνητικό πρόσημο. Επίσης, στο Σχήμα 3.8 παρατηρείται αρκετά κοντινή συσχέτιση των φωσφορικών σε όλα τα βάθη εκτός των 20 m, που εμφανίζει αρνητικό πρόσημο. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης των νιτρικών στα 20 m να διαφοροποιείται από τα άλλα σημεία, όπως και στο Σχήμα 3.9 στα πυριτικά. Τέλος, στο Σχήμα 3.10 οι συντελεστές συσχέτισης του ολικού ανόργανου αζώτου διαφοροποιούνται εντελώς σε όλα τα βάθη.

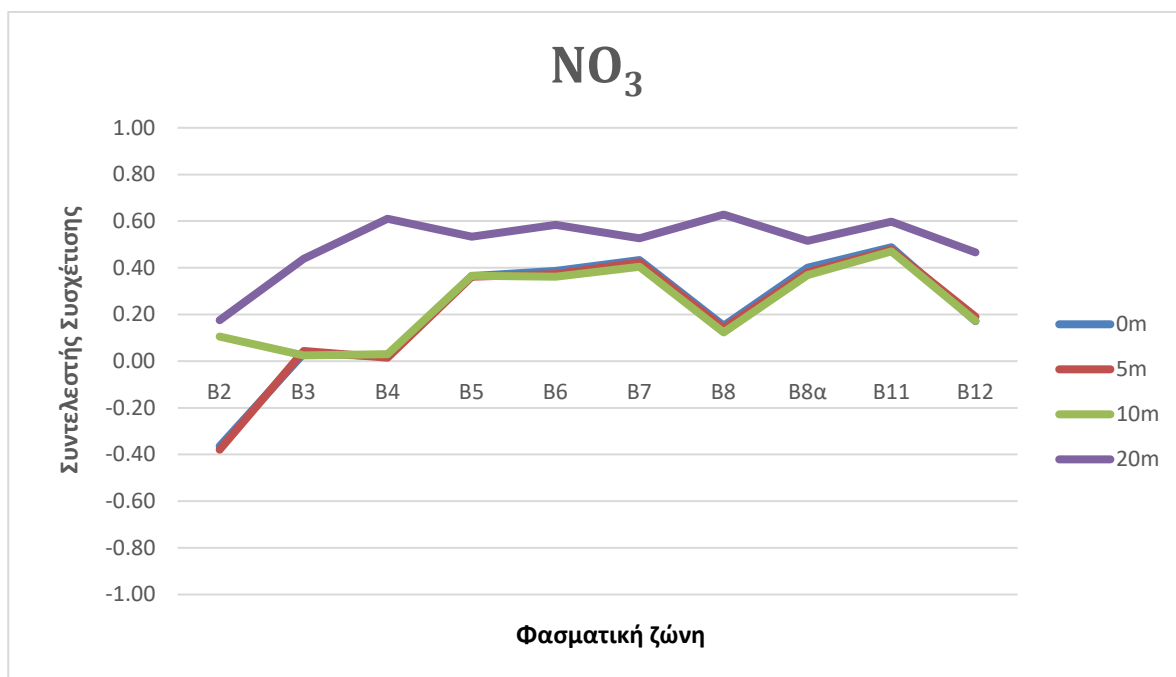
Στα Σχήματα 3.11 έως 3.16 αποτυπώνεται ο συντελεστής συσχέτισης των θρεπτικών αλάτων σε όλα τα βάθη και σε κάθε φασματικό κανάλι χωρίς τα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά σε ιχθυοκλωβούς. Στο Σχήμα 3.11 παρατηρείται ο συντελεστής συσχέτισης της αμμωνίας όπου στα 0m υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τα υπόλοιπα βάθη, τα οποία κυμαίνονται κοντά στο μηδέν. Στο Σχήμα 3.12 παρατηρείται αρκετά κοντινή συσχέτιση σε όλα τα βάθη, η οποία σημειώνει και αρνητικές τιμές στο μεγαλύτερο μέρος της. Ομοίως και στο Σχήμα 3.14 όπου παρατηρείται αρκετά κοντινή συσχέτιση των φωσφορικών σε όλα τα βάθη. Στο Σχήμα 3.13 η αντανάκλαση των νιτρικών συσχετίζεται αρκετά σε όλα τα βάθη, όπως και στο Σχήμα 3.15 με τον συντελεστή συσχέτισης των πυριτικών όπου παρουσιάζονται μικρές αλλαγές. Τέλος, στο Σχήμα 3.16 οι συντελεστές συσχέτισης του ολικού ανόργανου αζώτου εμφανίζουν αρνητικό πρόσημο, με αυτούς των 5 m να διαφοροποιούνται σε όλα τα φασματικά κανάλια.



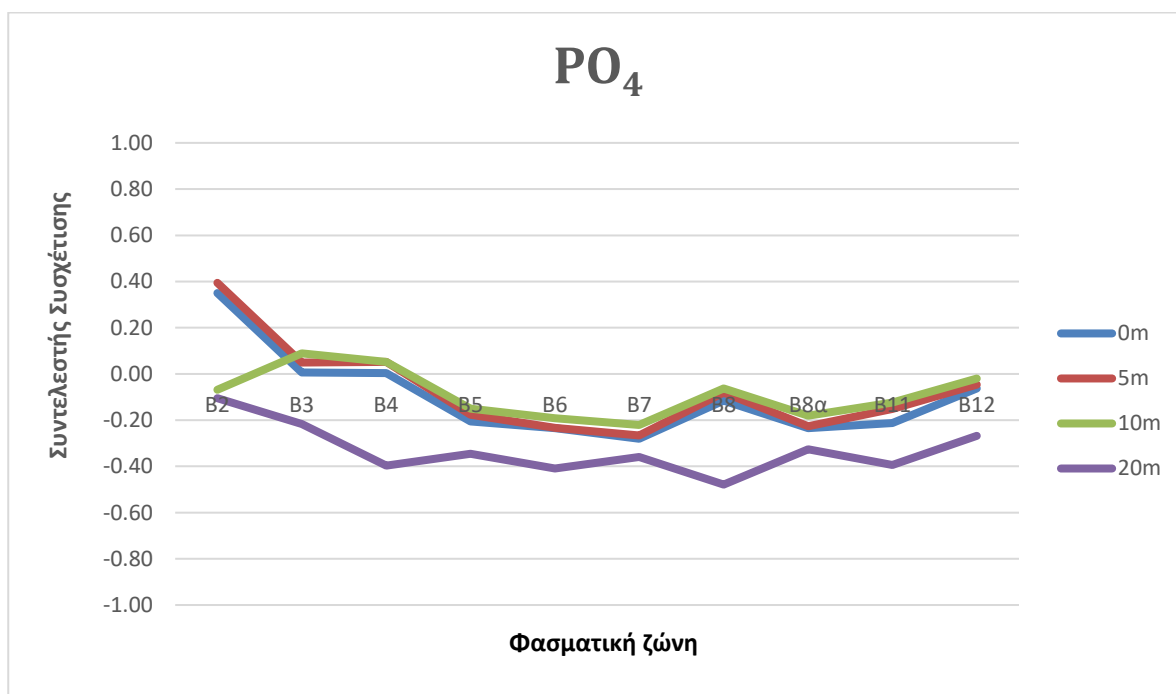
Σχήμα 3.5: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των αμμωνιακών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



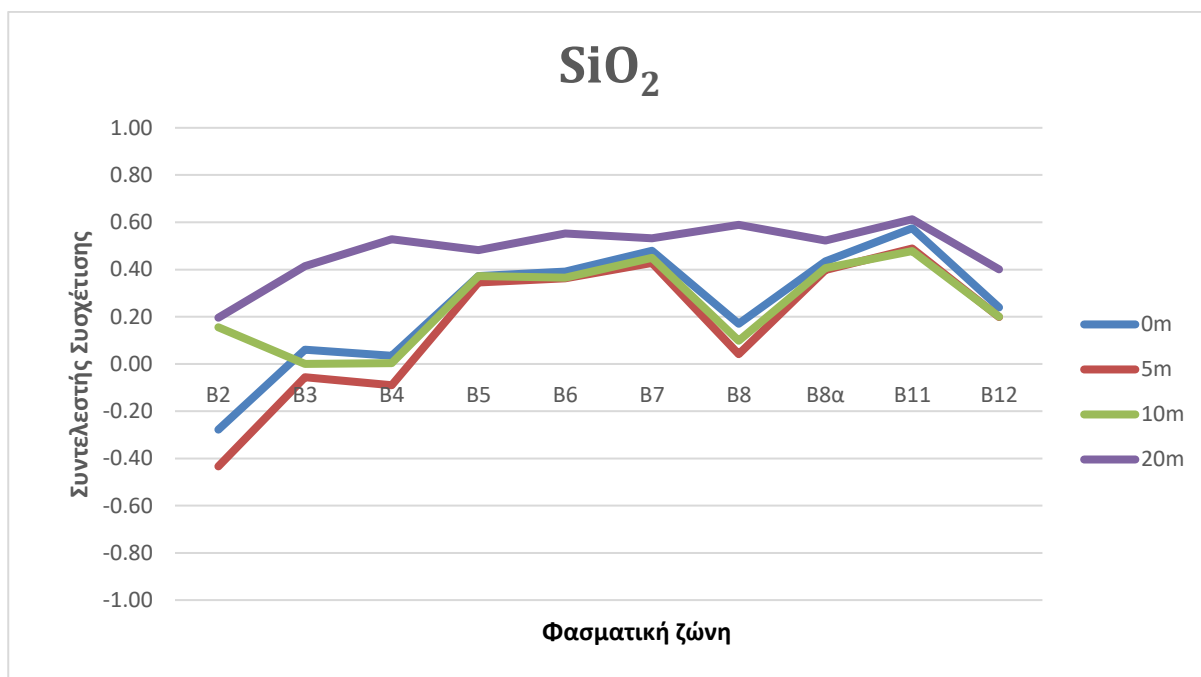
Σχήμα 3.6: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των νιτρωδών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



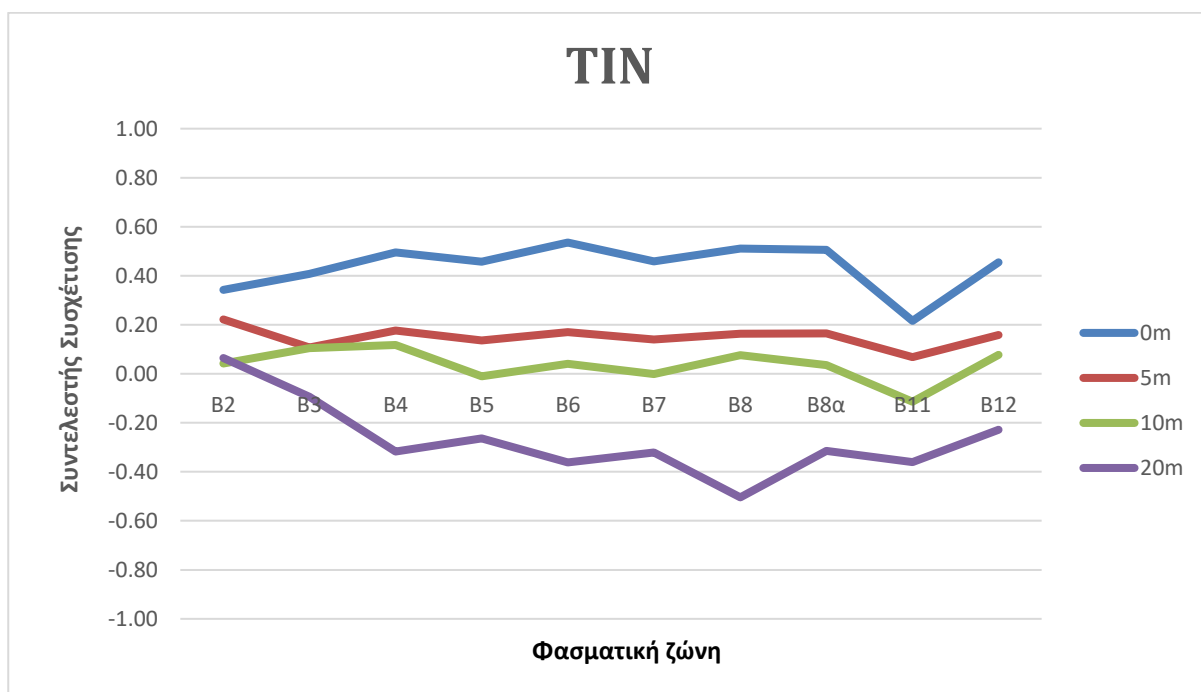
Σχήμα 3.7: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των νιτρικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



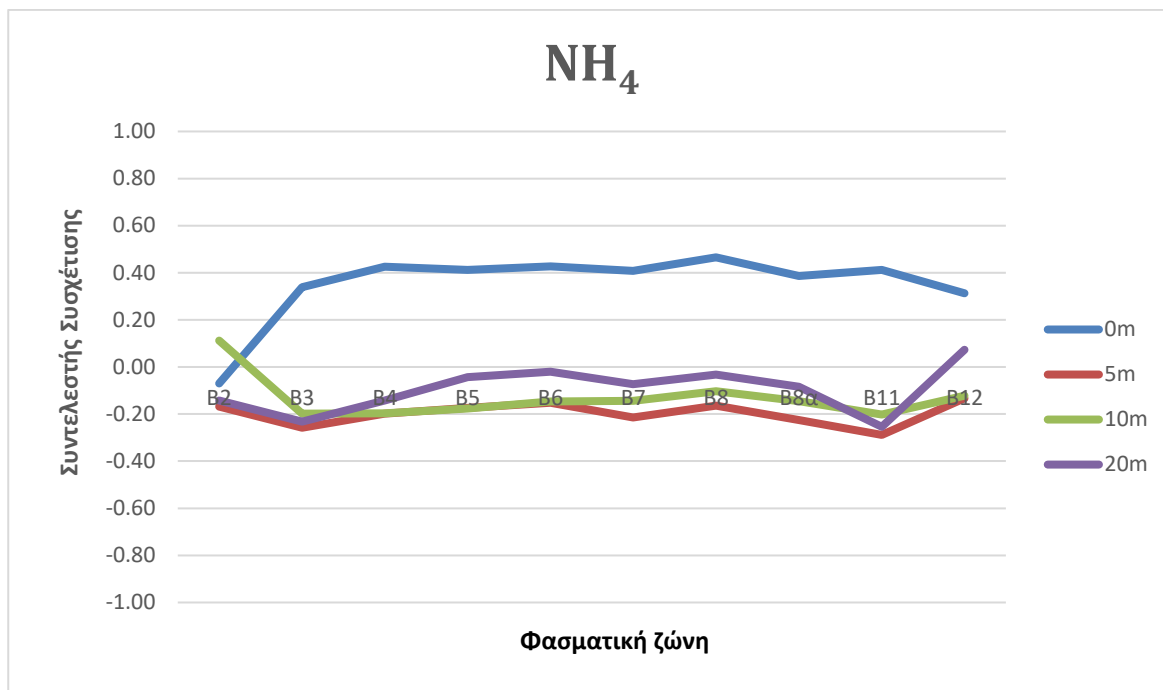
Σχήμα 3.8: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των φωσφορικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



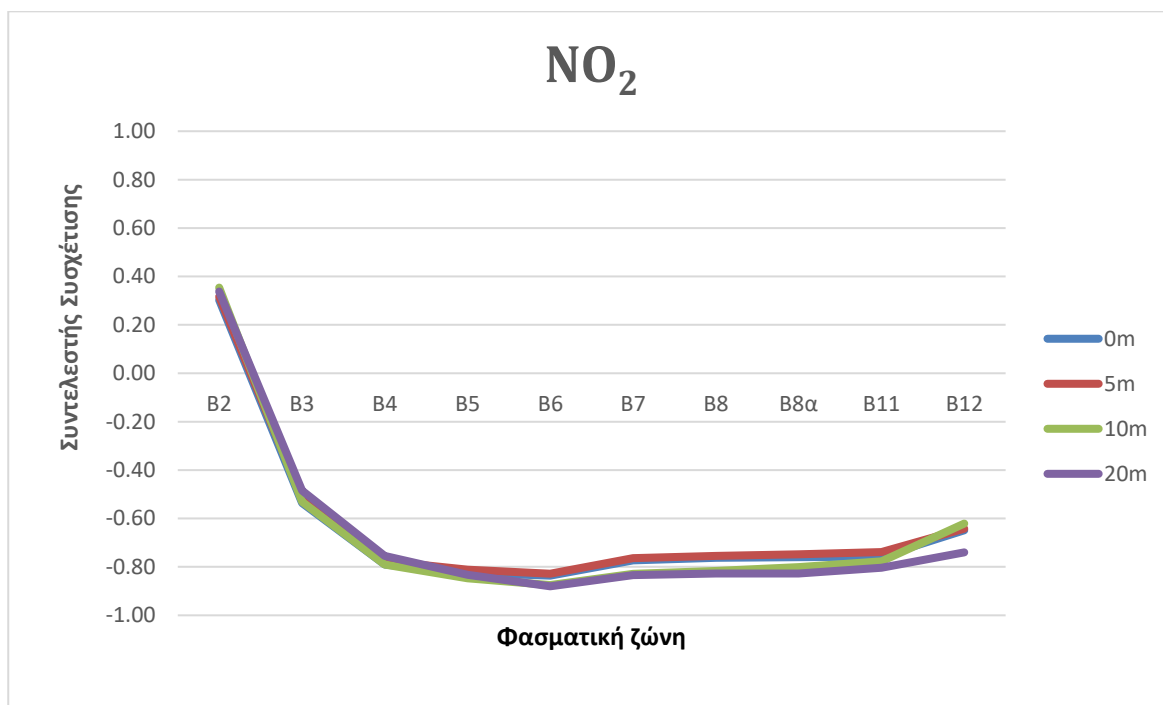
Σχήμα 3.9: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των πυριτικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



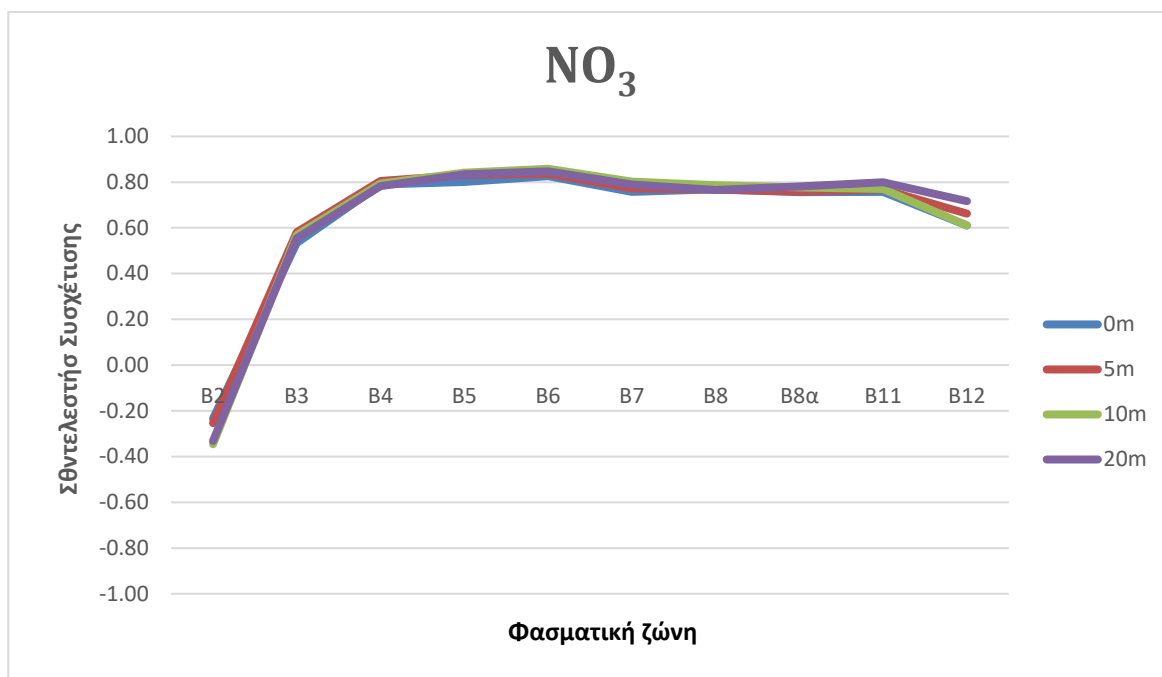
Σχήμα 3.10 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια.



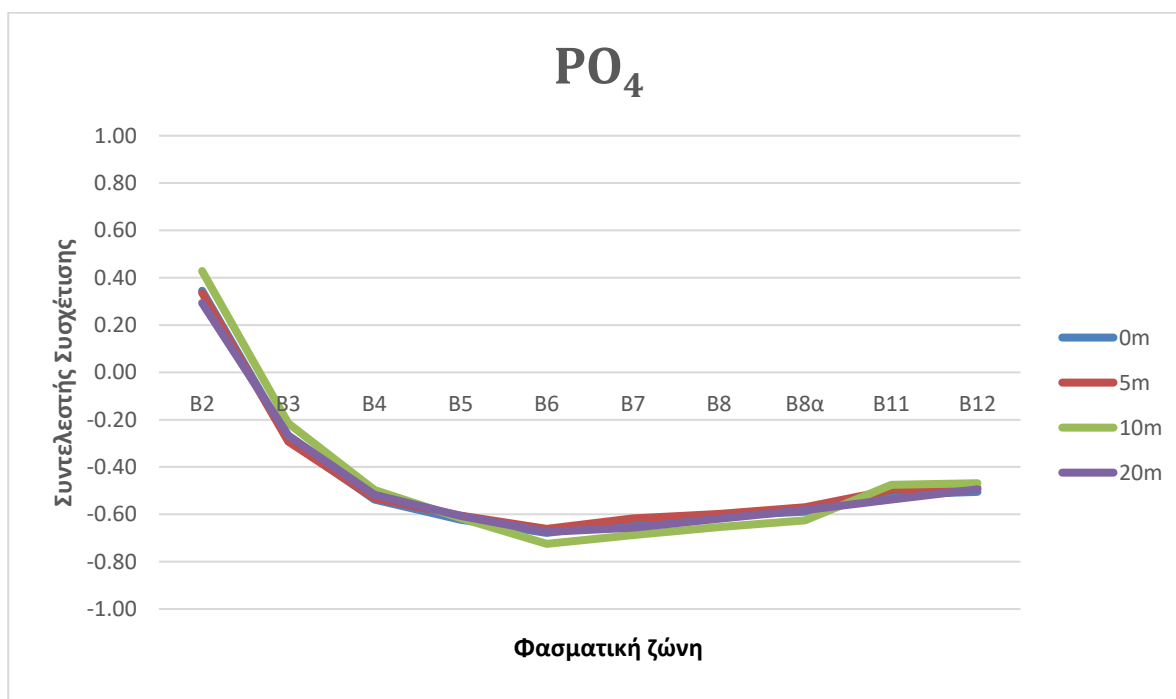
Σχήμα 3.11: Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των αμμωνιακών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.



Σχήμα 3.12 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των νιτρωδών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.



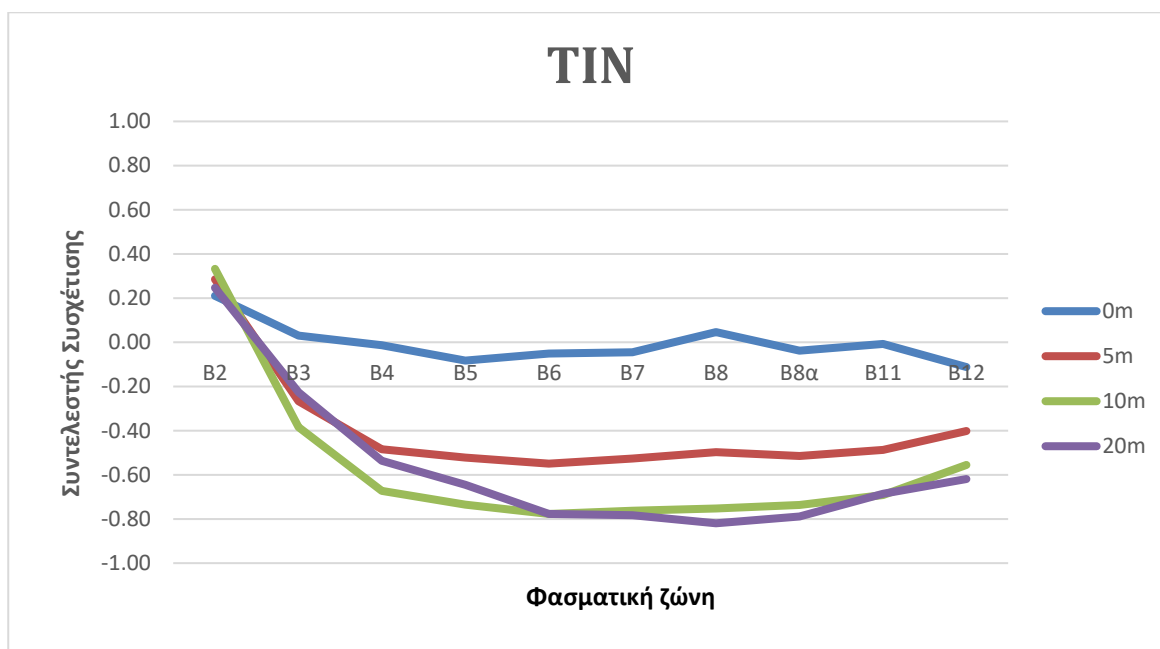
Σχήμα 3.13 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των νιτρικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.



Σχήμα 3.14 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των φωσφορικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.



Σχήμα 3.15 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης των πυριτικών στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.



Σχήμα 3.16 : Συντελεστής συσχέτισης (R^2) τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου στα 0, 5, 10 και 20 m σε διάφορα φασματικά κανάλια, χωρίς τα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.

Από τις γραφικές παραστάσεις του συντελεστή συσχέτισης των τιμών ανάκλασης και συγκέντρωσης θρεπτικών προκύπτει ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη ανομοιομορφία ανάμεσα στα 4 βάθη. Όπως προαναφέρθηκε αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις και τα δεδομένα των σημείων που βρίσκονταν κοντά σε ιχθυοκλωβούς, τα οποία φαίνεται πως επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

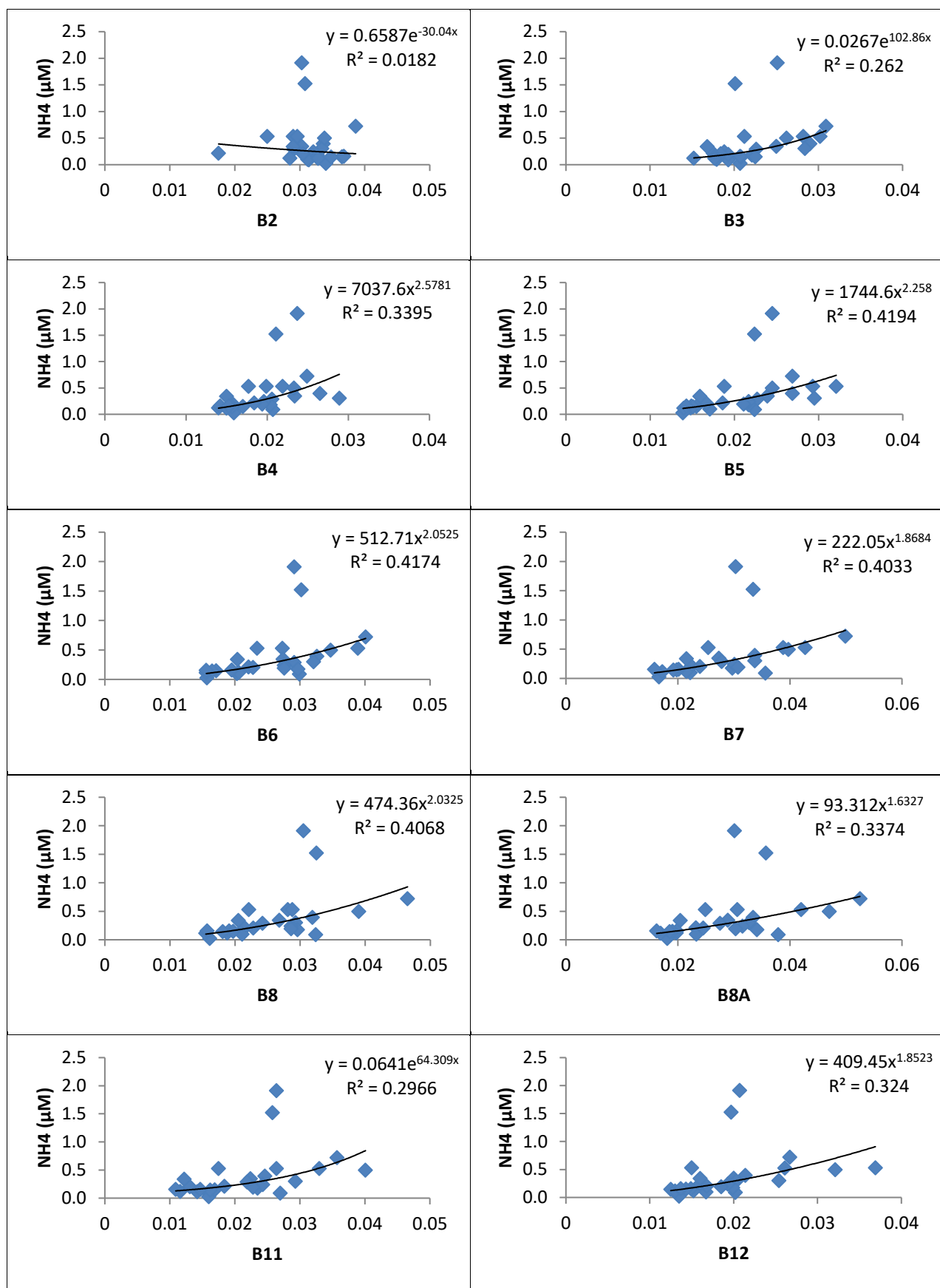
Από τις γραφικές παραστάσεις που δημιουργήθηκαν παρατηρήθηκε ότι:

- τα αμμωνιακά (NH_4) παρουσίασαν σχετικά κοντινό συντελεστή συσχέτισης στο βάθος των 5, 10, και 20 m, ενώ στο βάθος των 0 m παρατηρήθηκε αρκετά αυξημένος συντελεστής συσχέτισης σε σχέση με τα υπόλοιπα βάθη σχεδόν σε όλες τις φασματικές ζώνες.
- Τα νιτρώδη (NO_2) παρουσίασαν αρνητικές συσχετίσεις αρκετά κοντινές σε όλα τα βάθη, σε κάθε φασματικό κανάλι.
- Τα νιτρικά (NO_3) παρουσίασαν θετικές συσχετίσεις αρκετά κοντινές και στα τέσσερα βάθη.
- Οι συσχετίσεις των φωσφορικών (PO_4), παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά με τα νιτρώδη και έγιναν αρνητικές λίγο πριν το φασματικό κανάλι B3.
- Τα πυριτικά (SiO_2) παρουσίασαν αρκετά κοντινές συσχετίσεις στα φασματικά κανάλια B2 και B3, ενώ διαφοροποιήθηκαν ελάχιστα στα υπόλοιπα φασματικά κανάλια σε όλα τα βάθη.
- Από το ολικό ανόργανο άζωτο (TIN), οι συσχετίσεις που προέκυψαν ήταν κοντινές στα φασματικά κανάλια B2 και B3 στα 5, 10 και 20 m, ενώ διαφοροποιήθηκαν σε όλη την υπόλοιπη φασματική ζώνη και στα τέσσερα βάθη.

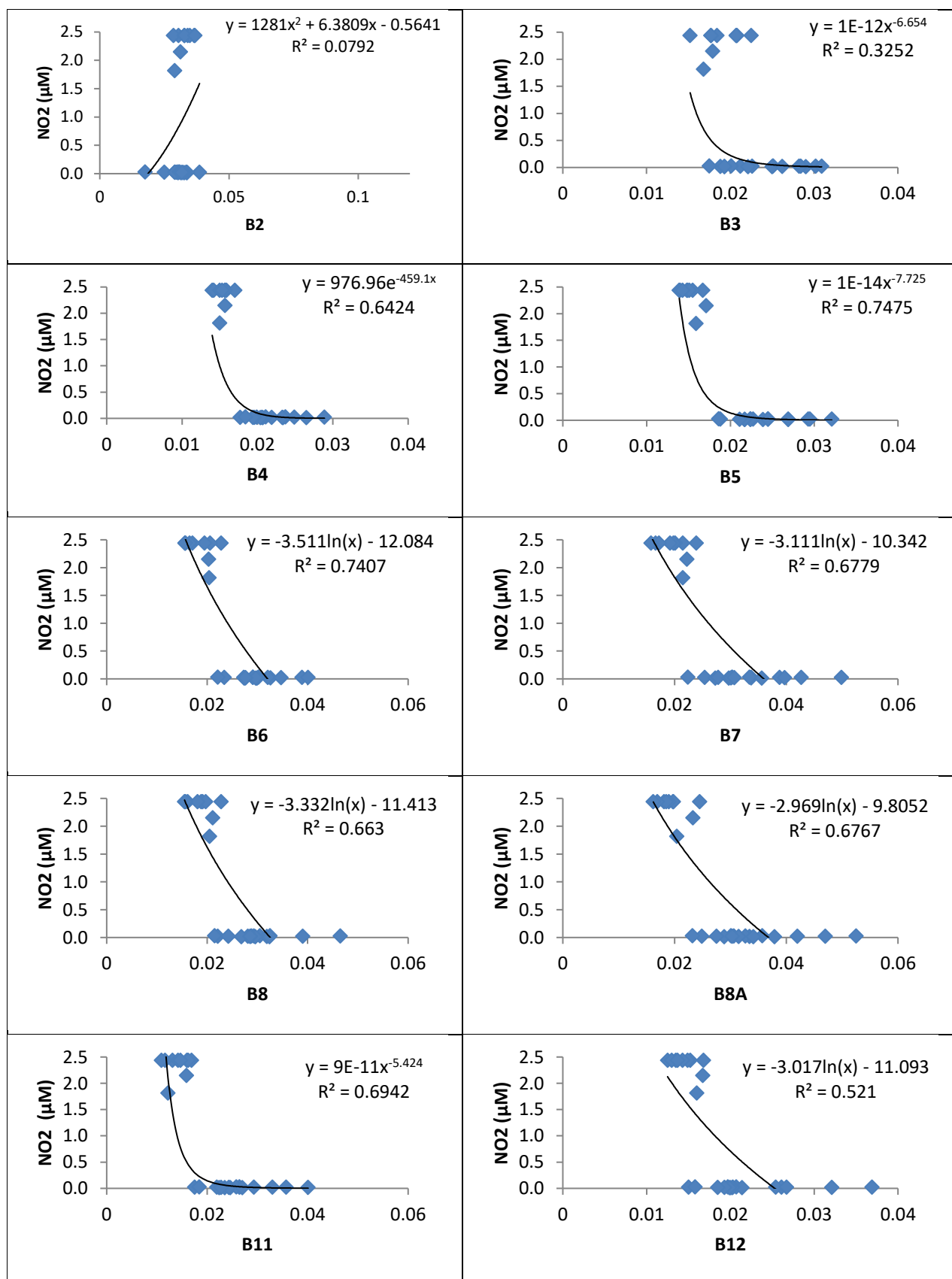
3.6 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων συσχέτισης θρεπτικών αλάτων με δορυφορικά δεδομένα

Στα Σχήματα 3.17 έως 3.40 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των 5 θρεπτικών αλάτων (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , SiO_2) και του ολικού ανόργανου αζώτου (TIN) με κάθε κανάλι του δορυφόρου Sentinel-2, για όλα τα σημεία δειγματοληψίας ταυτόχρονα από τις δύο περιοχές έρευνας στα 0, 5, 10 και 20 m βάθος. Στα ίδια Σχήματα φαίνονται οι γραμμές παλινδρόμησης που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (R^2). Πιο συγκεκριμένα:

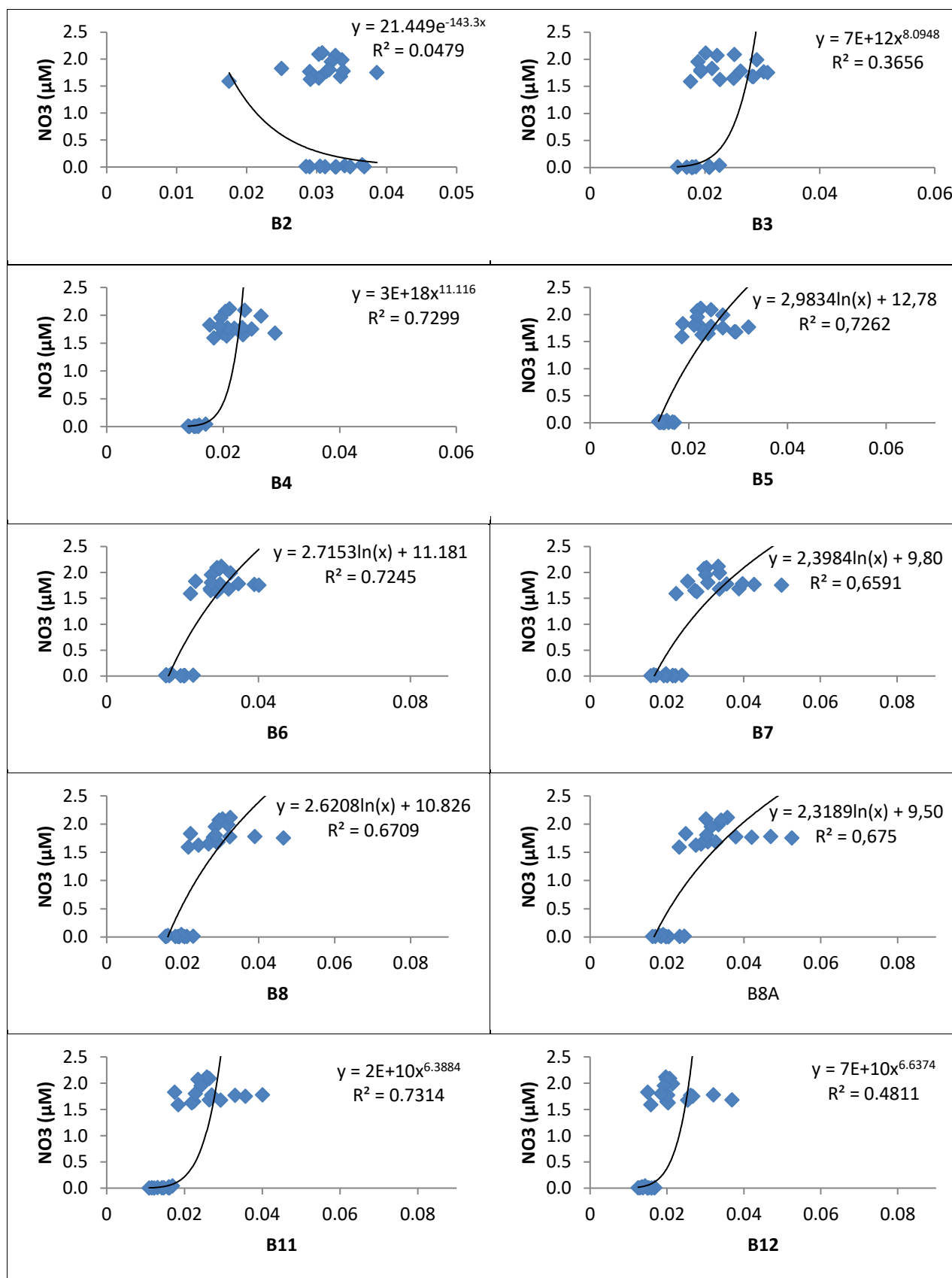
- ο συντελεστής συσχέτισης στα 0 m για τα αμμωνιακά κυμάνθηκε από 0,08 στο φασματικό κανάλι B2 έως 0,42 στο κανάλι B5. Τα νιτρώδη παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,12) και μέγιστο (0,65) στο B6. Τα νιτρικά είχαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,05) και μέγιστο (0,73) στα φασματικά κανάλια B4, B5 και B11. Τα φωσφορικά παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,08) και μέγιστο (0,75) στο B5. Τα πυριτικά εμφάνισαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,10) και μέγιστο (0,65) στο φασματικό κανάλι B6. Το ολικό ανόργανο άζωτο παρουσίασε πολύ χαμηλό συντελεστή συσχέτισης σε όλα τα φασματικά κανάλια, αφού η τιμή του δεν ξεπέρασε το 0,2.
- ο συντελεστής συσχέτισης στα 5 m για τα αμμωνιακά κυμάνθηκε από 0,02 στο φασματικό κανάλι B2 έως 0,42 στο κανάλι B5 και B6. Τα νιτρώδη παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,08) και μέγιστο (0,75) στο B5. Τα νιτρικά είχαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,05) και μέγιστο (0,73) στο φασματικό κανάλι B5. Τα φωσφορικά παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 με (0,12) και μέγιστο (0,65) στο B6. Τα πυριτικά εμφάνισαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,10) και



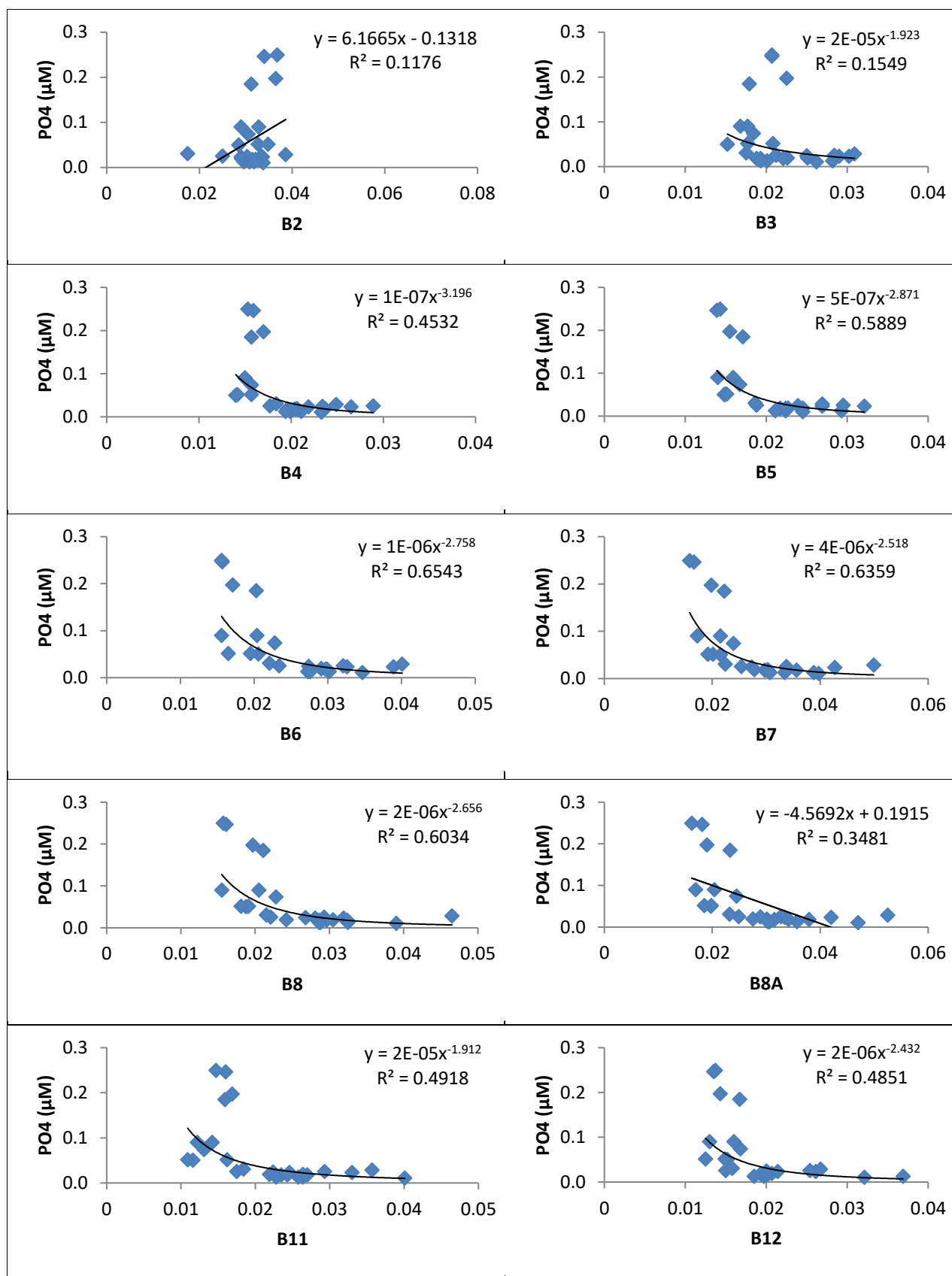
Σχήμα 3.17: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης αμμωνιακών (NH₄) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



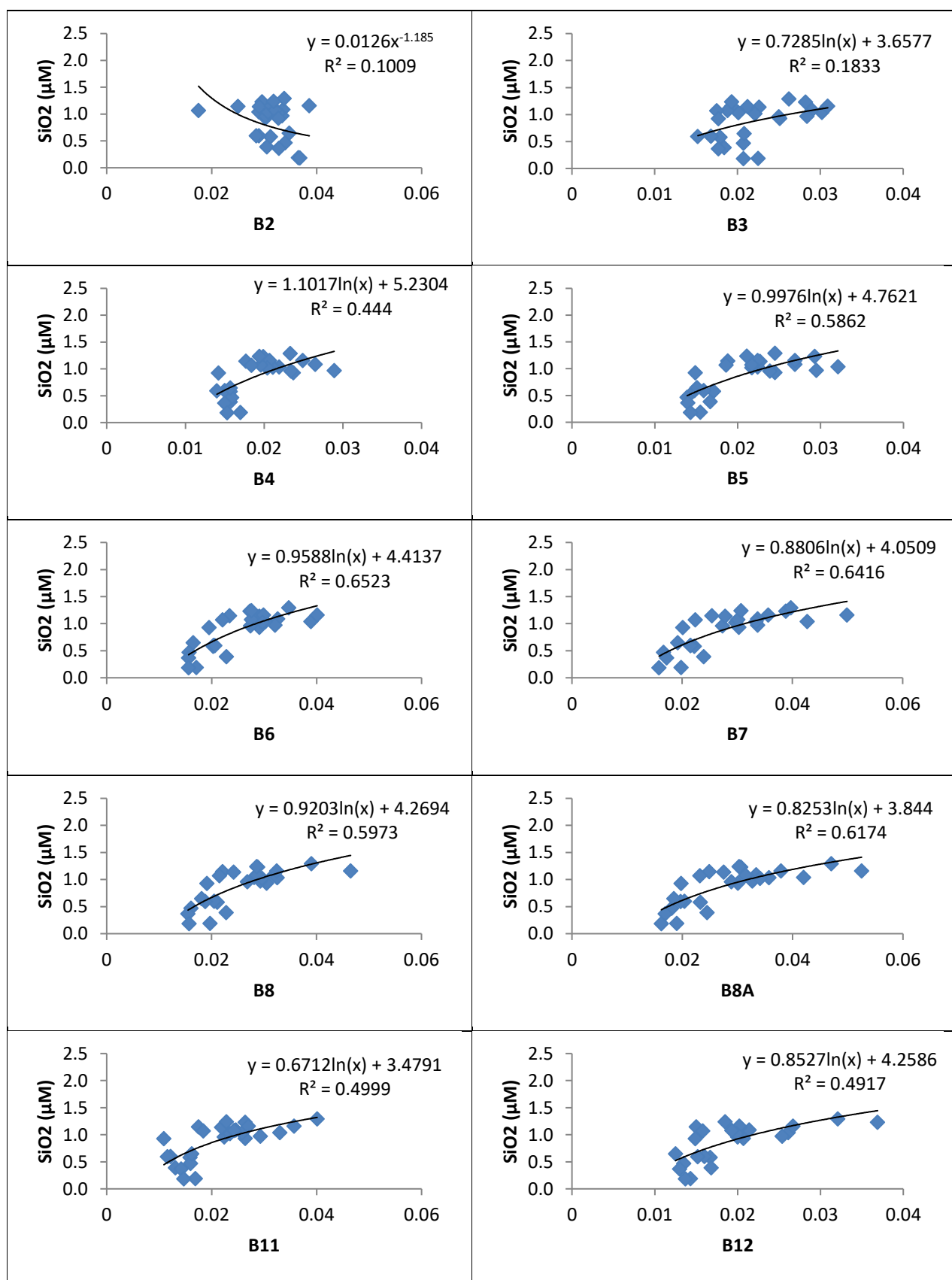
Σχήμα 3.18: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρωδών (NO₂) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



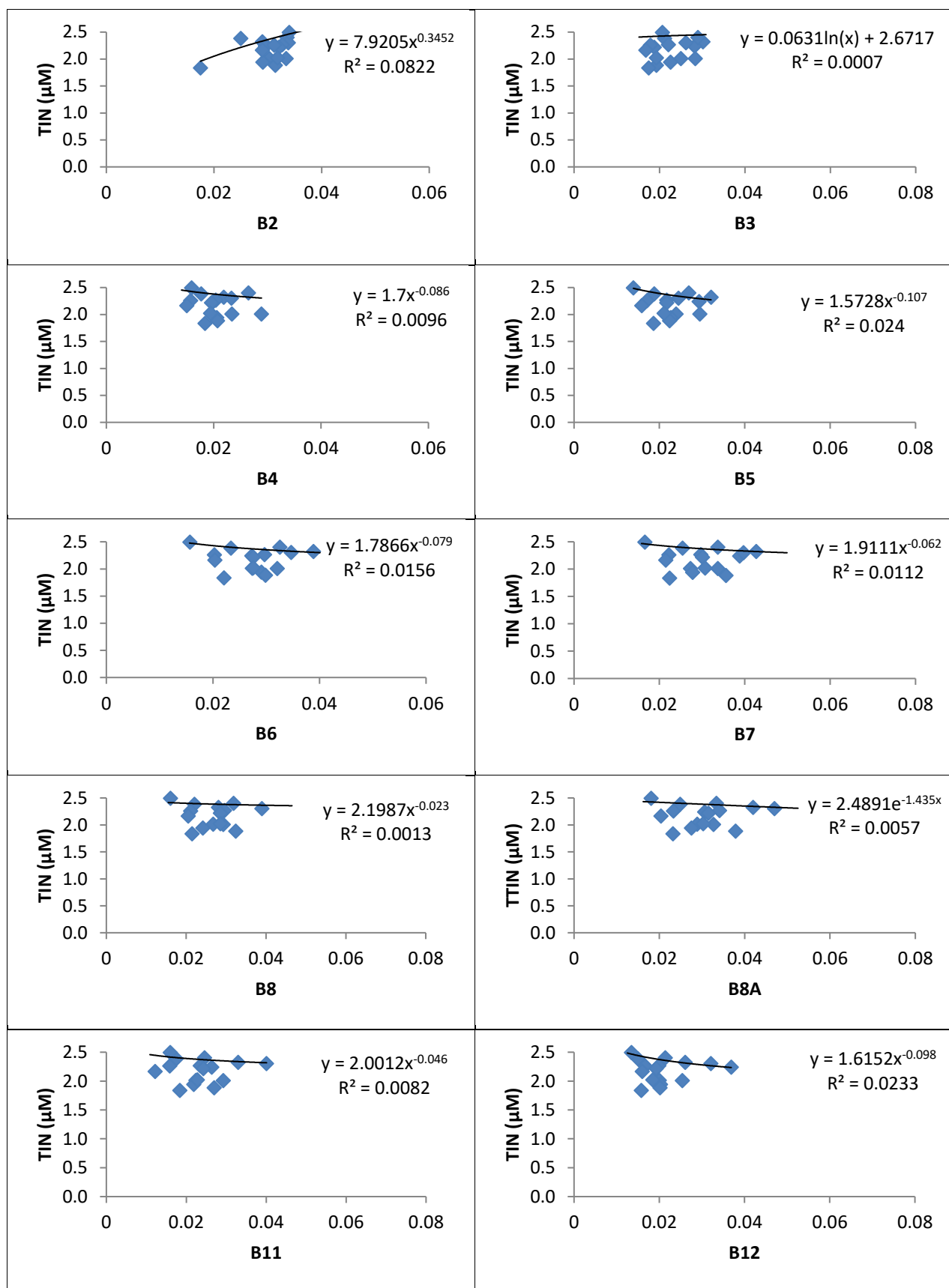
Σχήμα 3.19: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρικών (NO₃) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



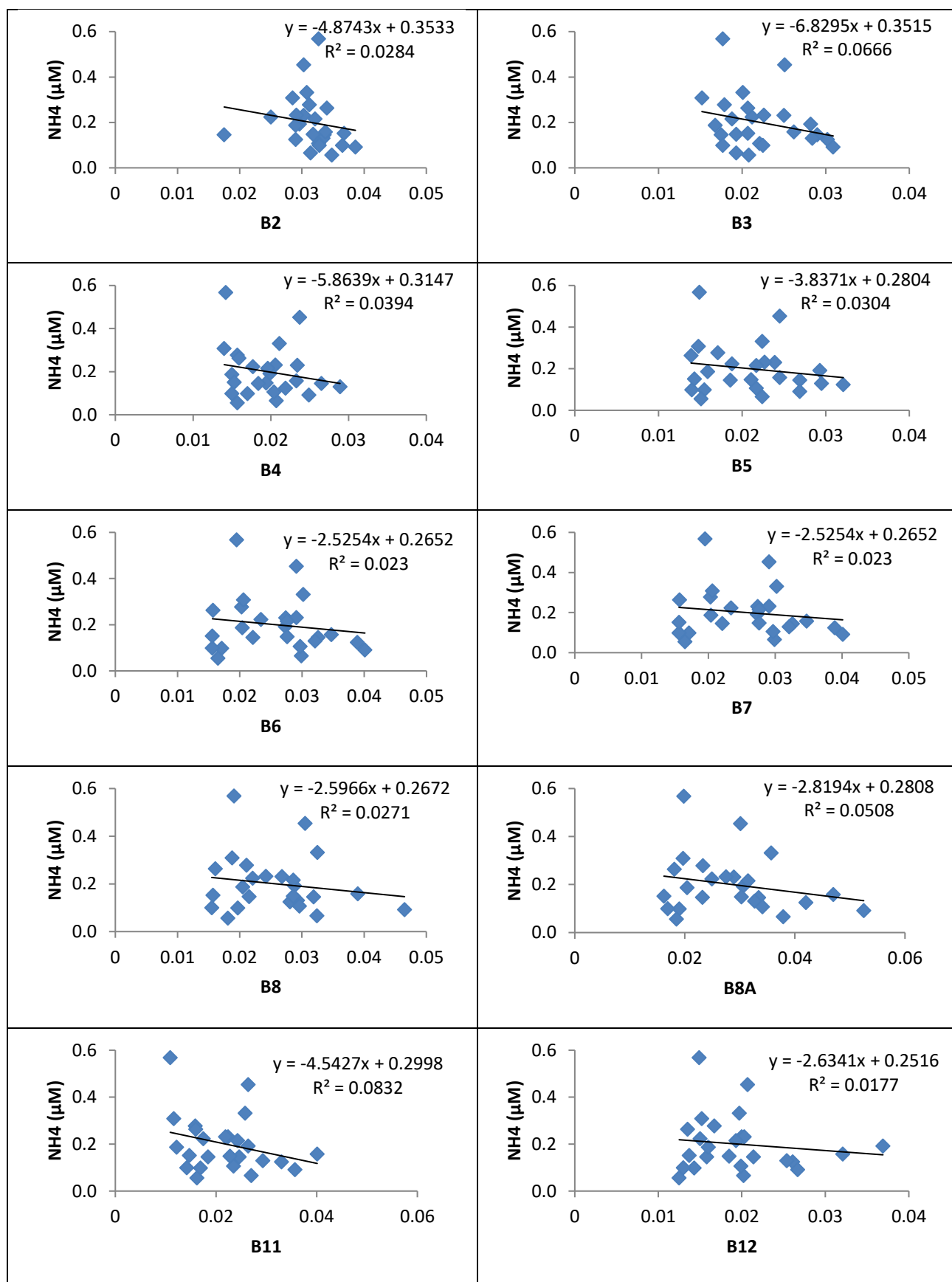
Σχήμα 3.20: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης φωσφορικών (PO₄) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



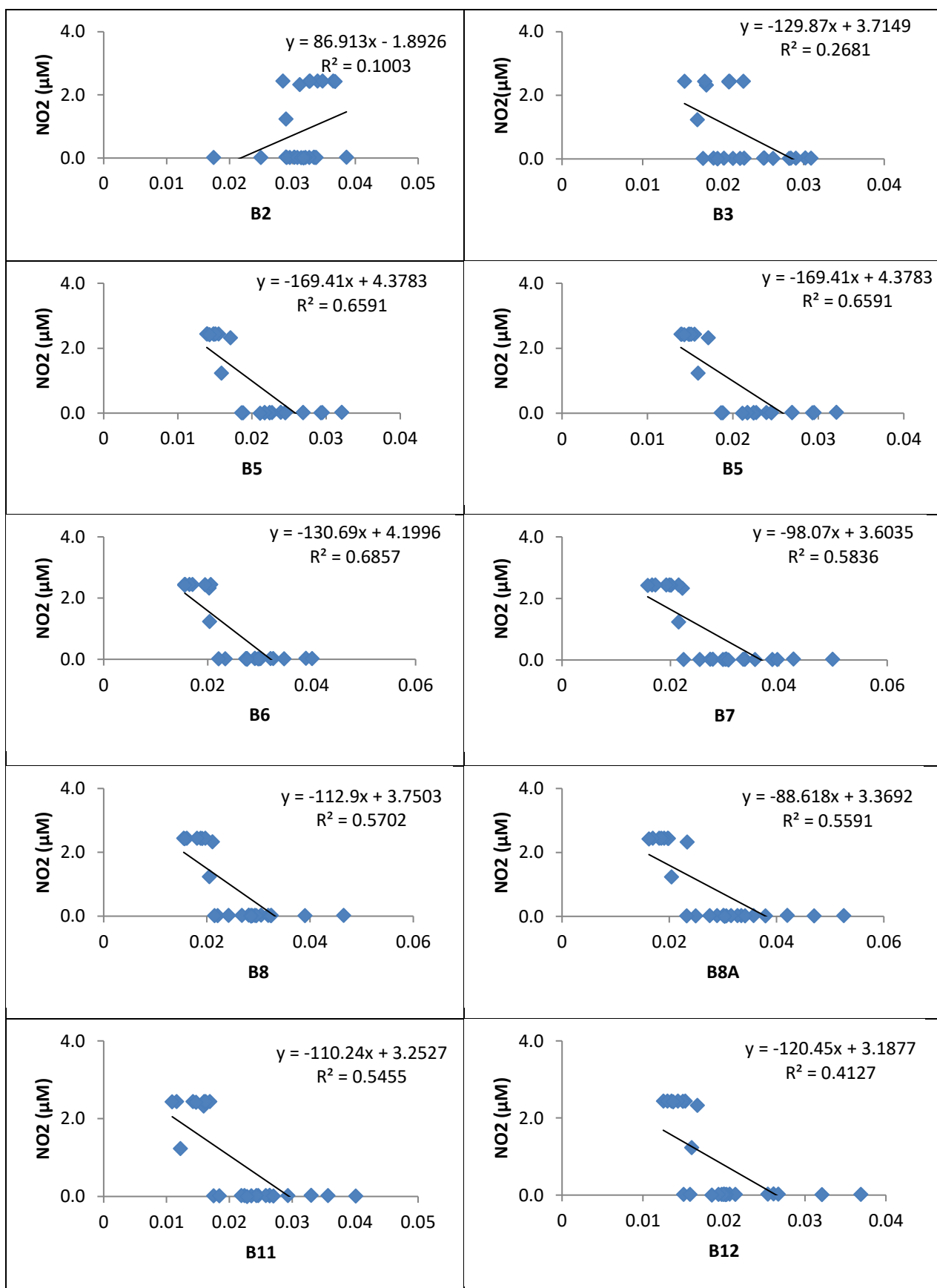
Σχήμα 3.21: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης πυριτικών (SiO_2) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



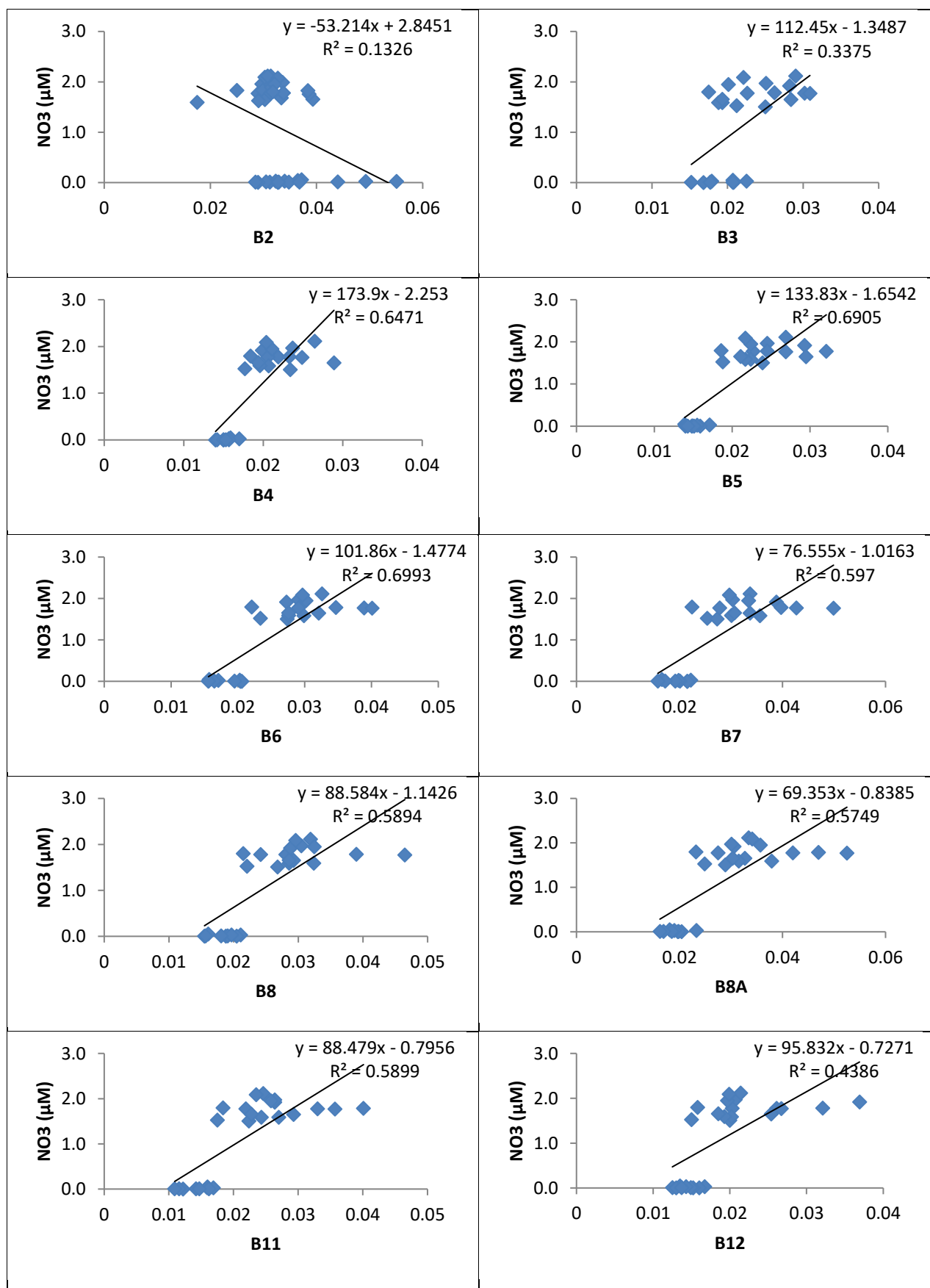
Σχήμα 3.22: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου (TIN) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 0 m.



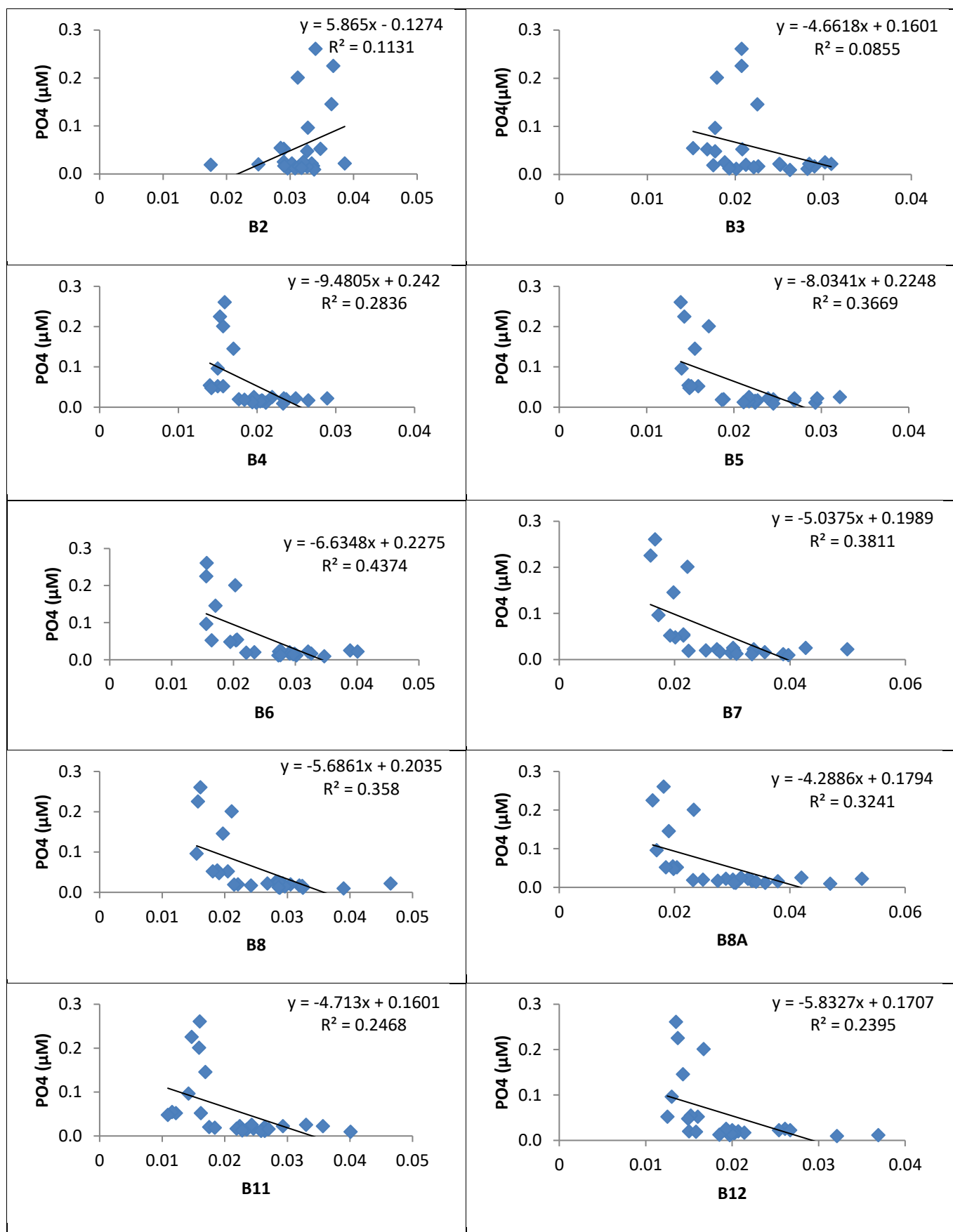
Σχήμα 3.23: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης αμμωνιακών (NH_4) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



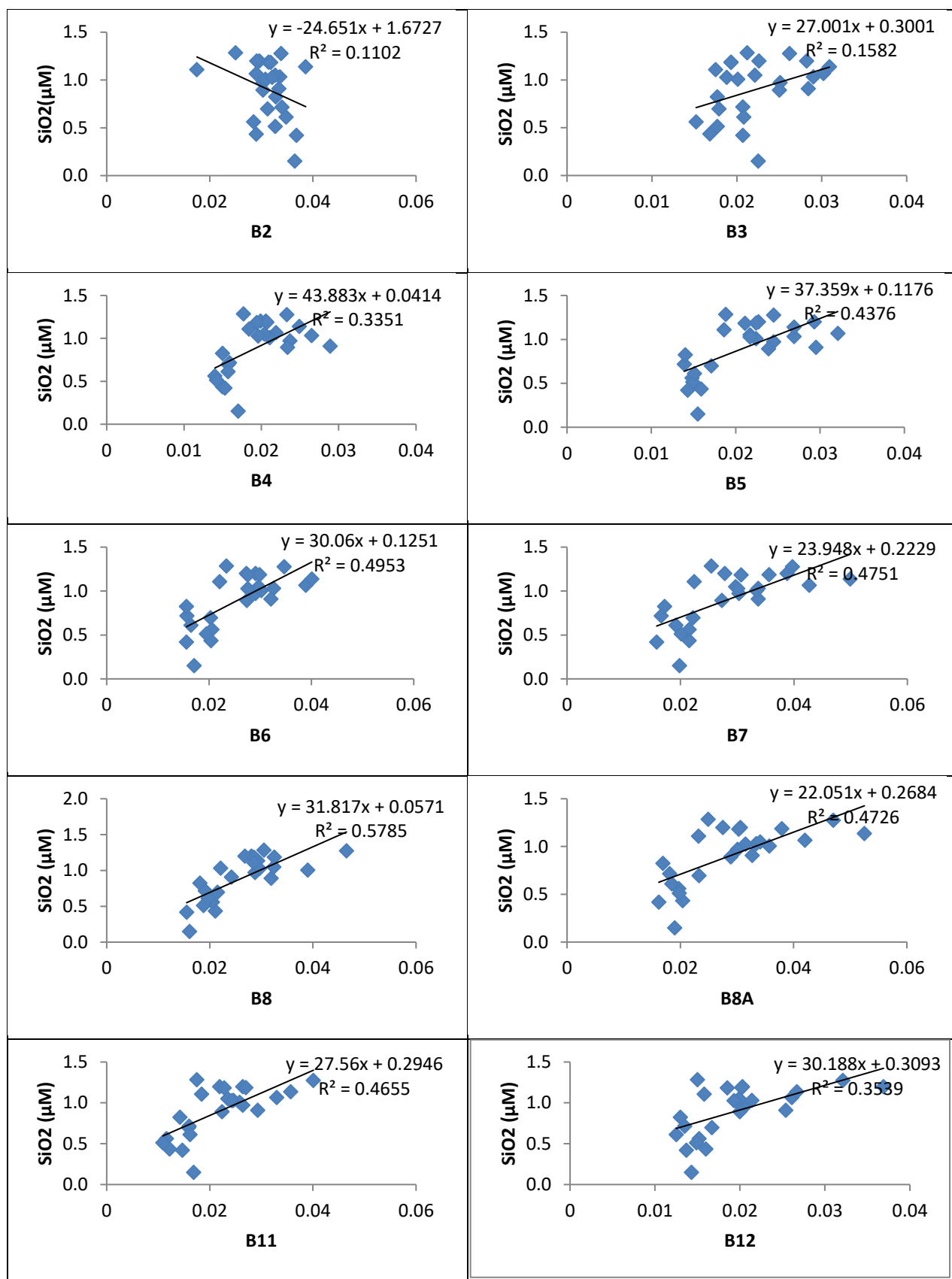
Σχήμα 3.24: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρωδών (NO₂) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



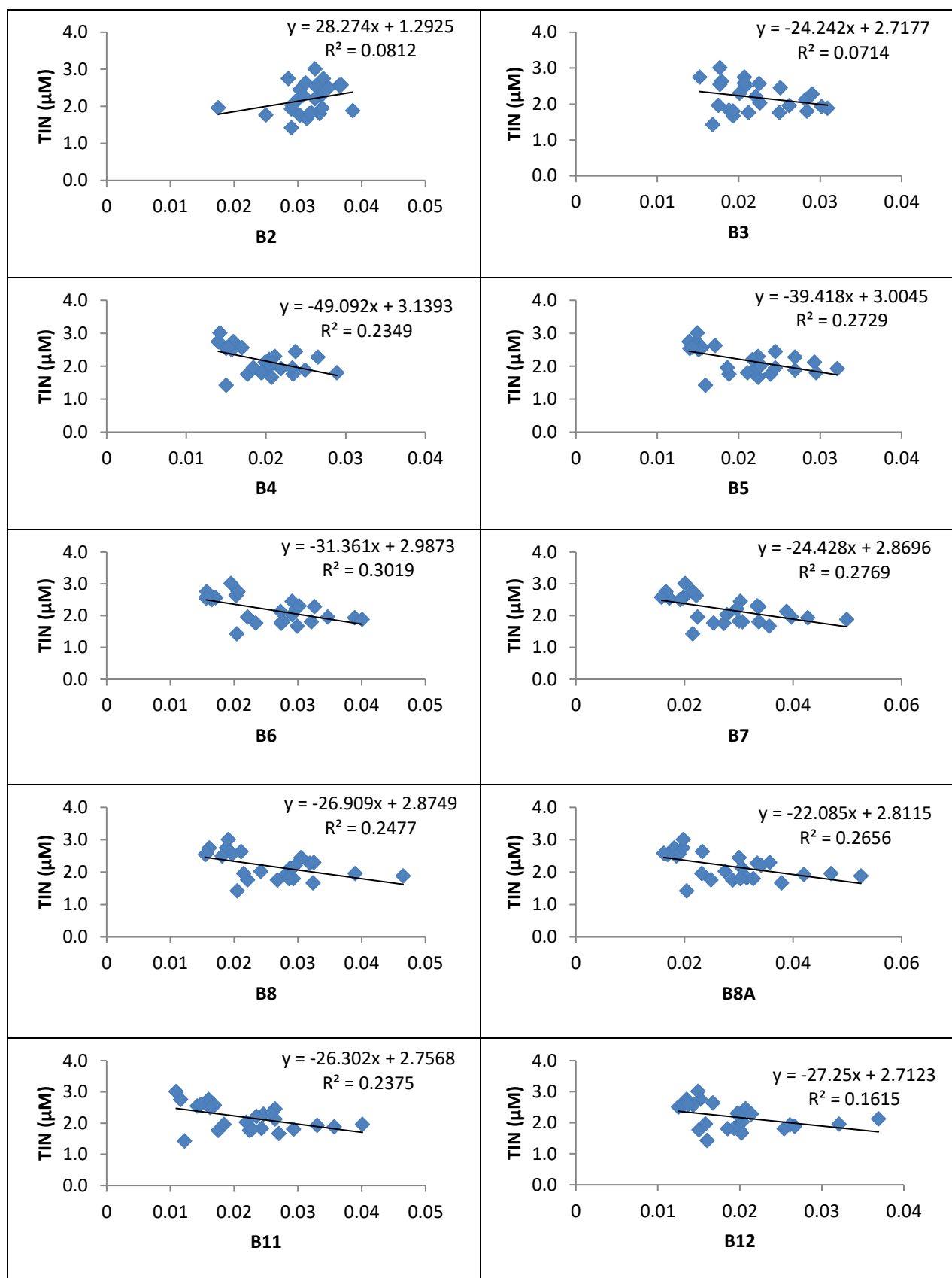
Σχήμα 3.25: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρικών (NO_3) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



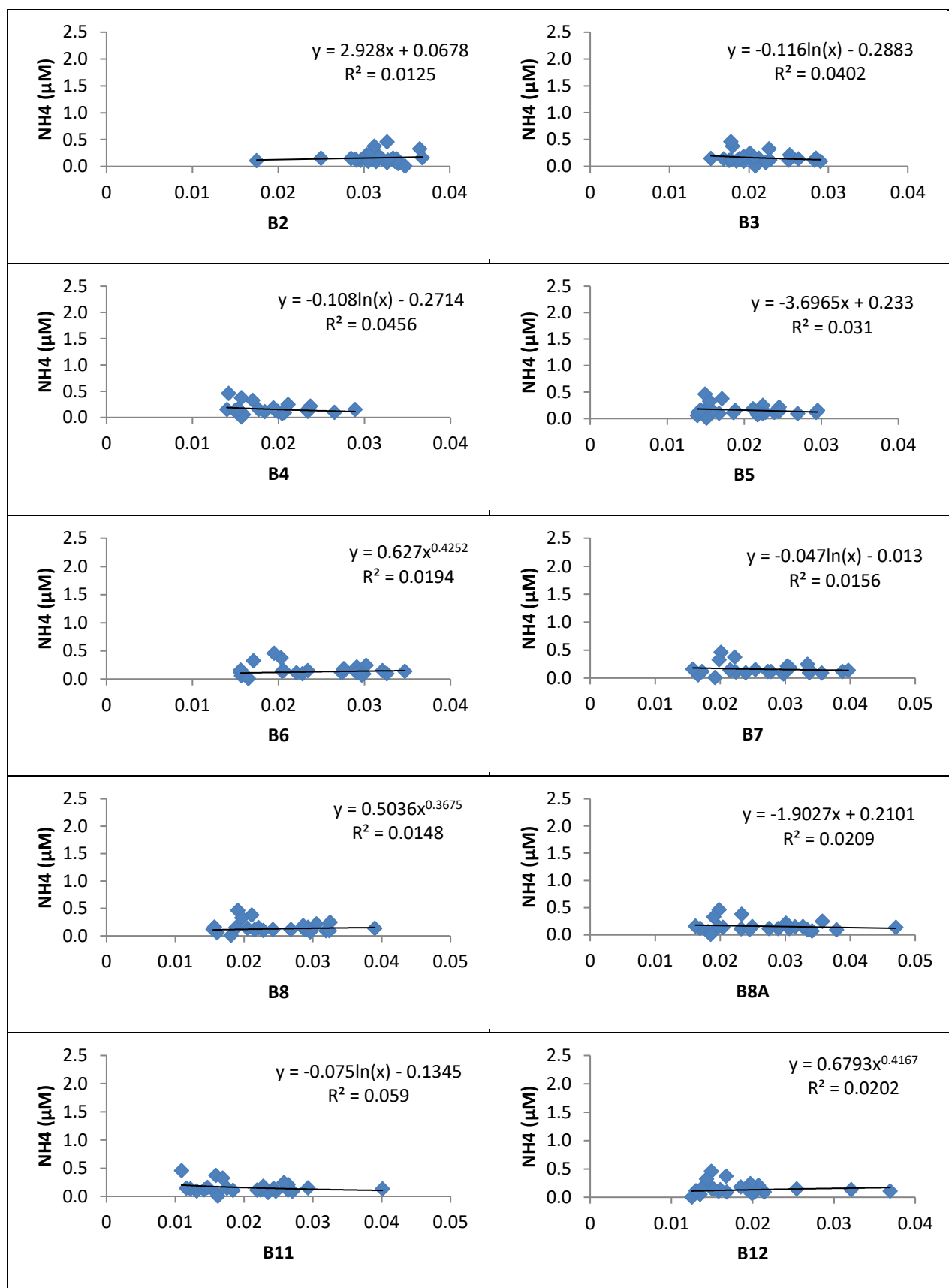
Σχήμα 3.26: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης φωσφορικών (PO₄) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



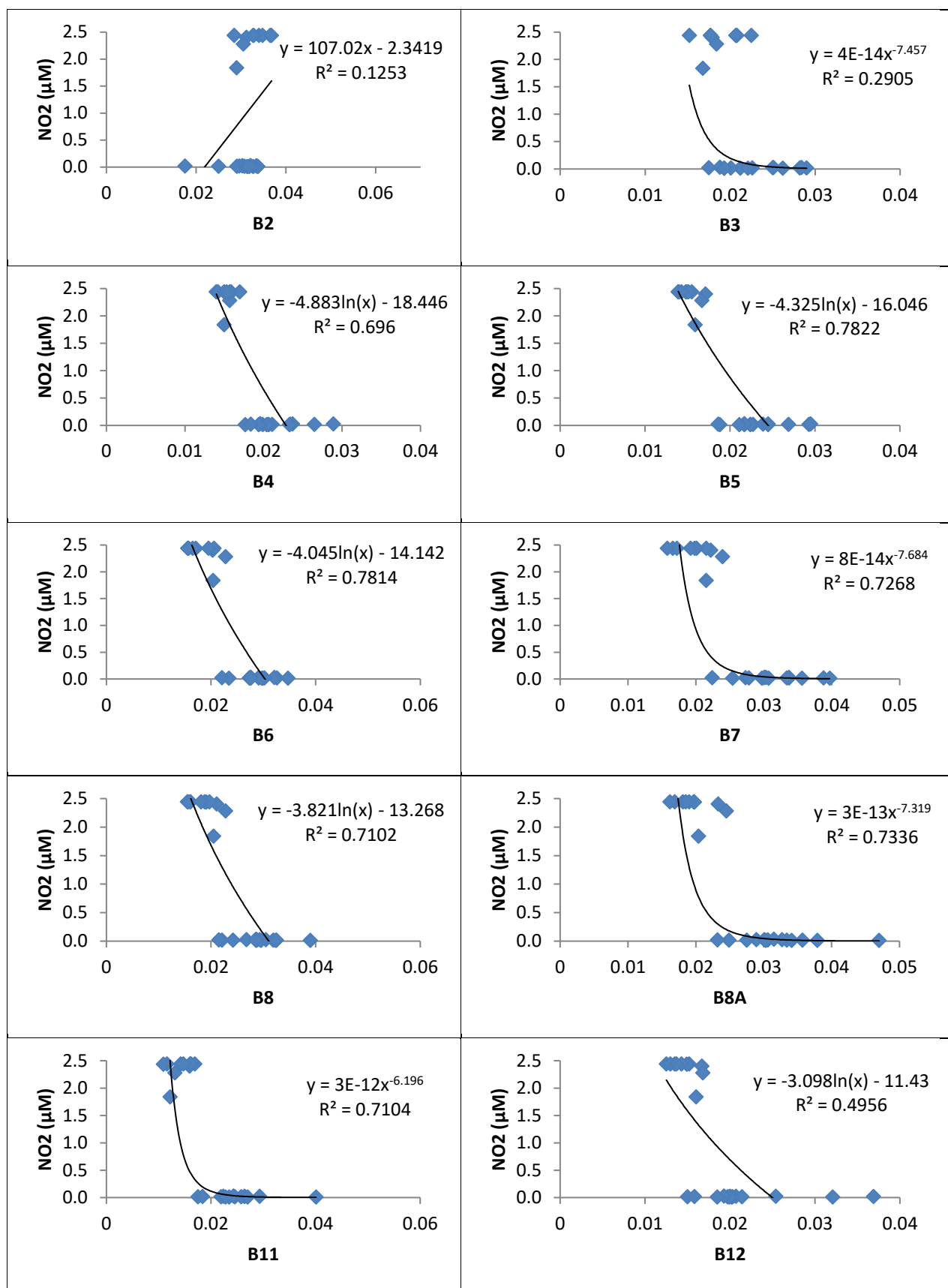
Σχήμα 3.27: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης πυριτικών (SiO_2) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



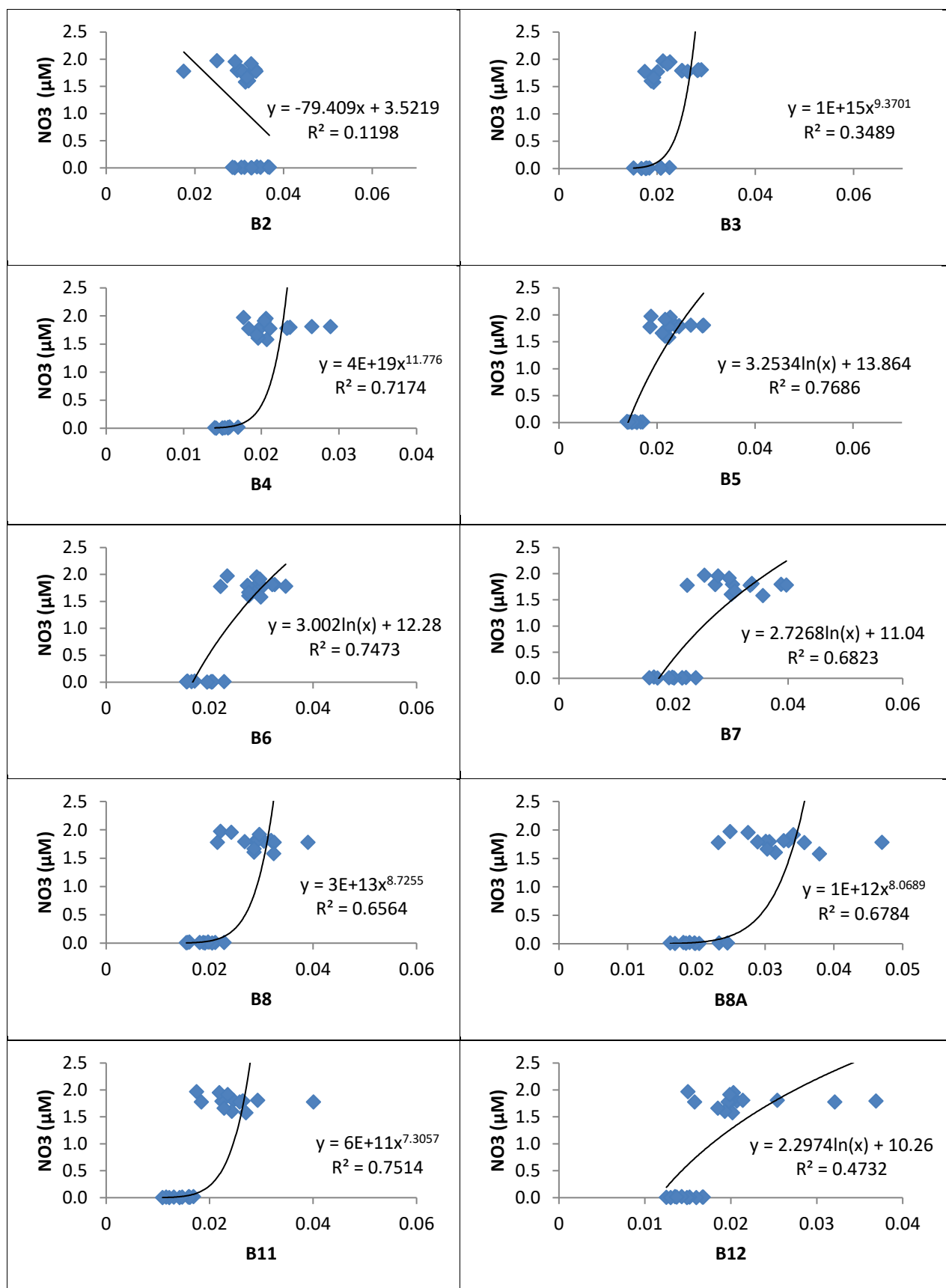
Σχήμα 3.28: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου (TIN) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 5 m.



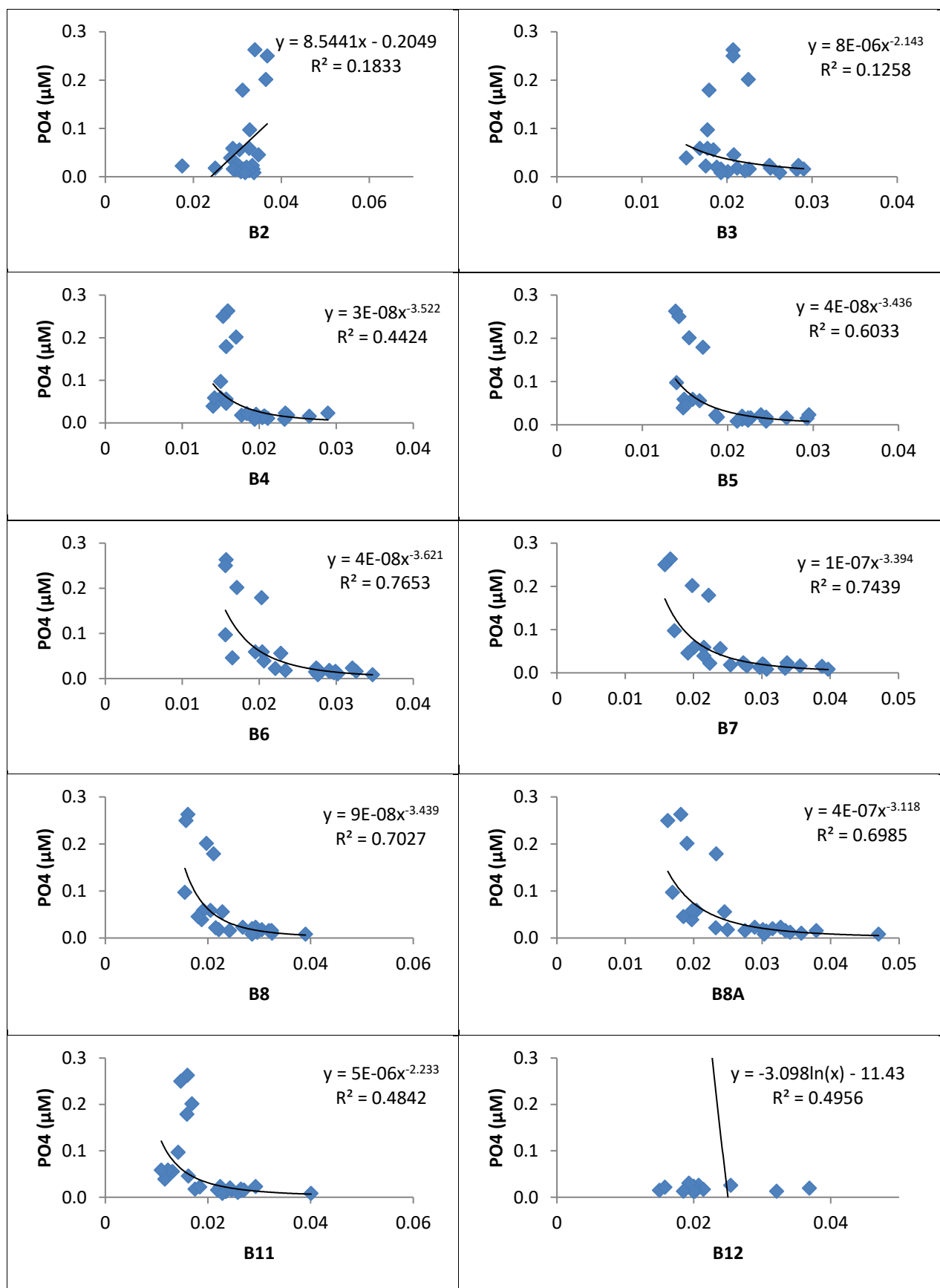
Σχήμα 3.29: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης αμμωνιακών (NH_4) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



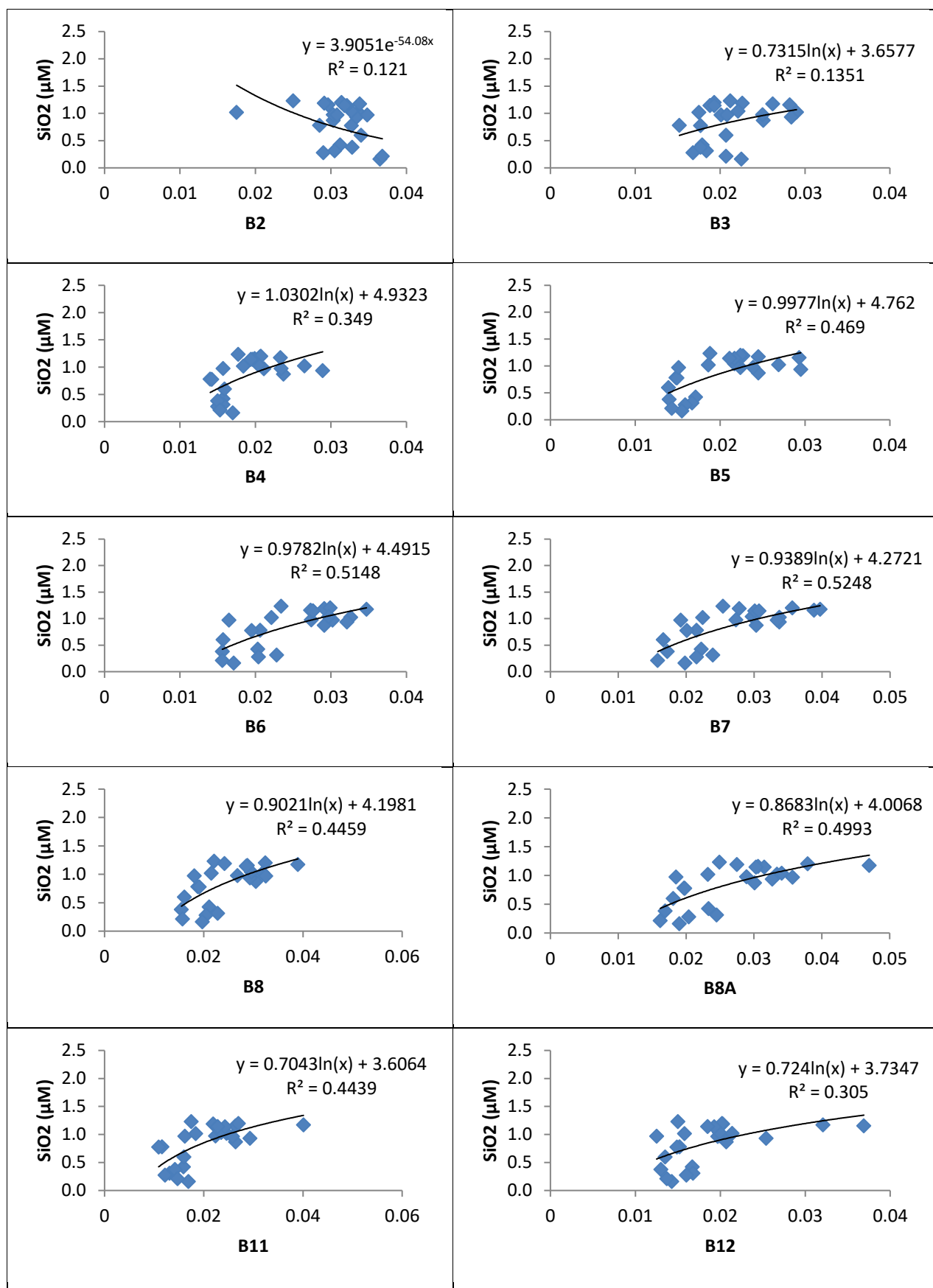
Σχήμα 3.30: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρωδών (NO₂) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



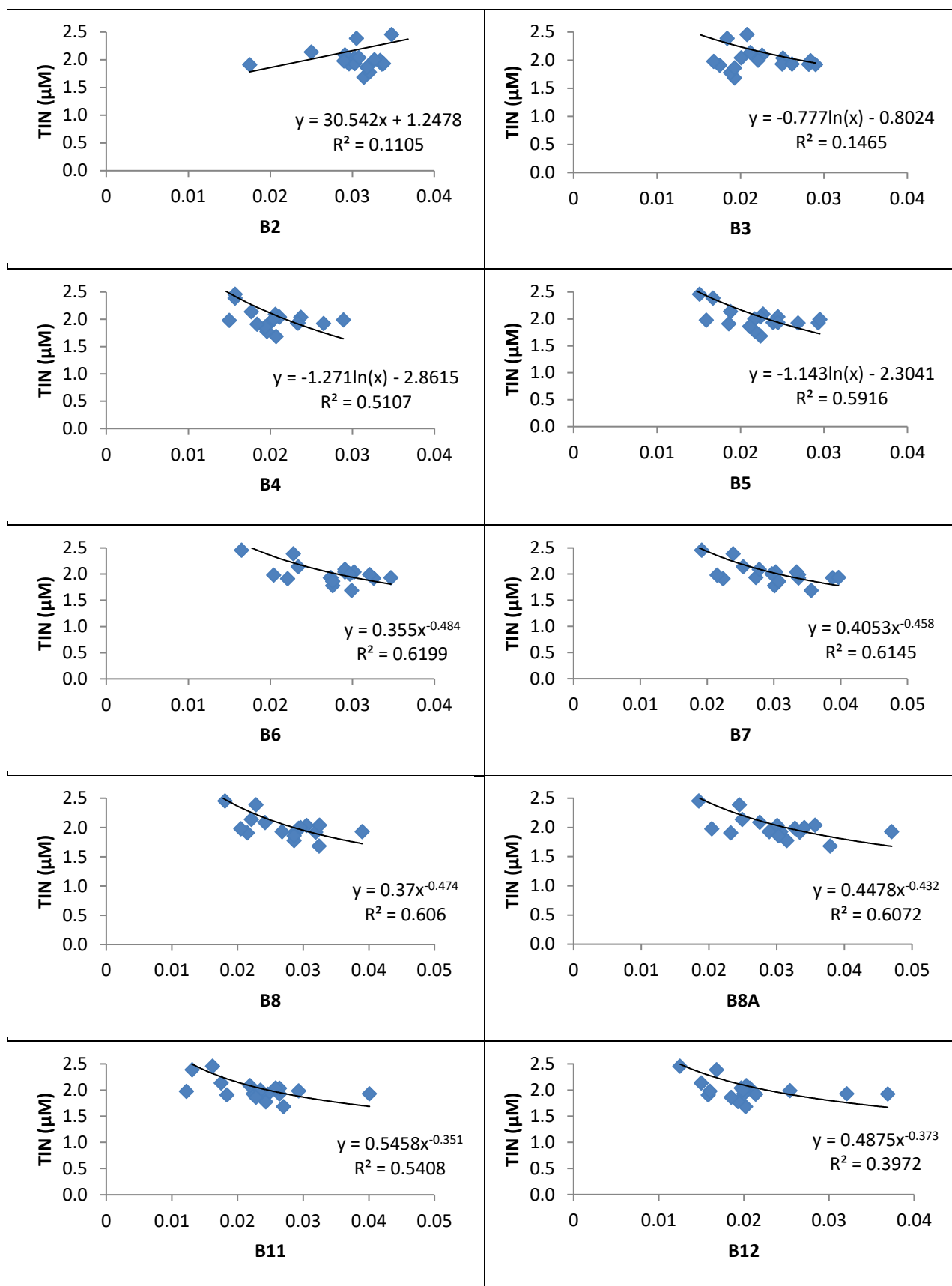
Σχήμα 3.31: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρικών (NO_3) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



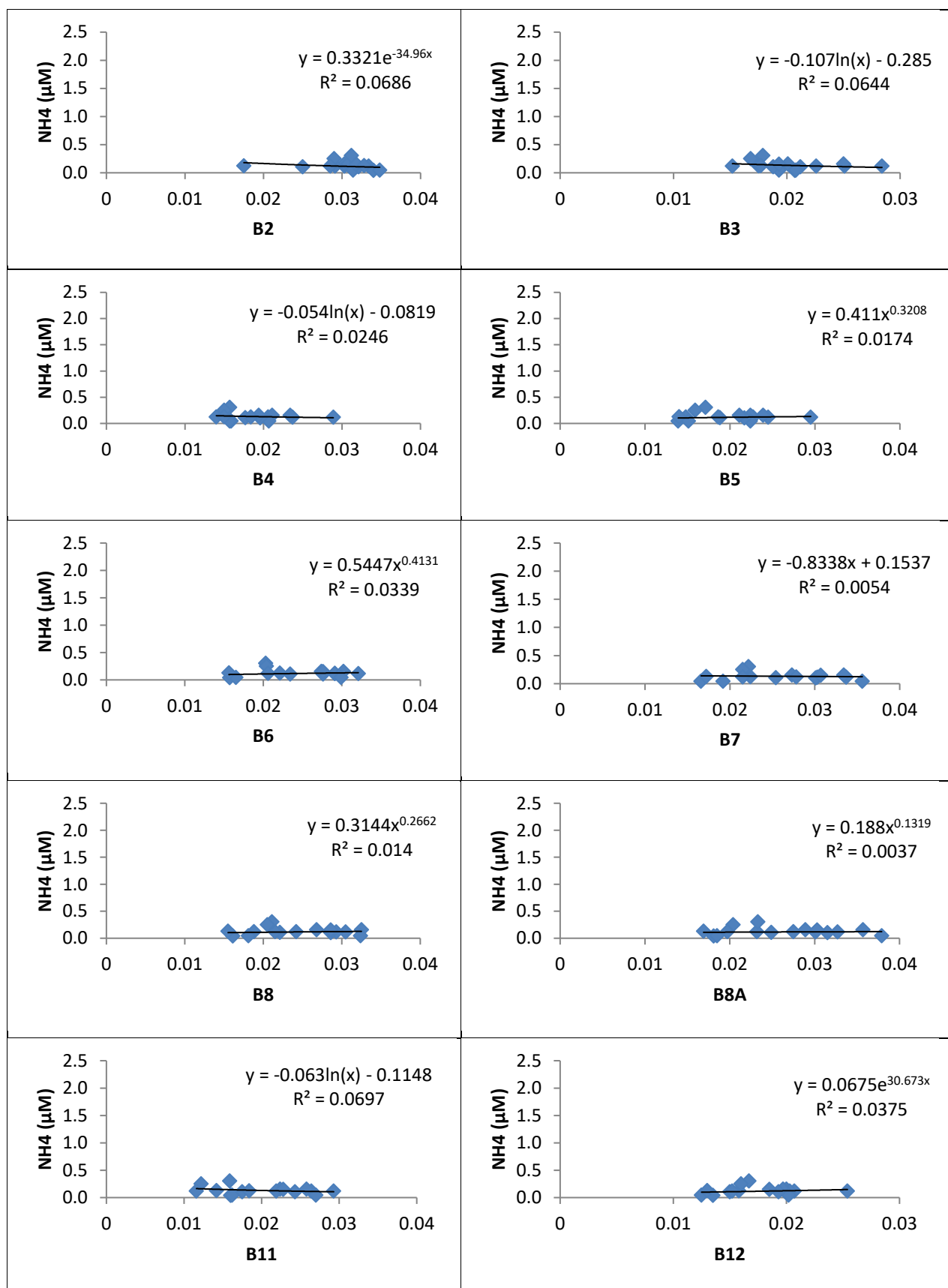
Σχήμα 3.32: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης φωσφορικών (PO₄) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



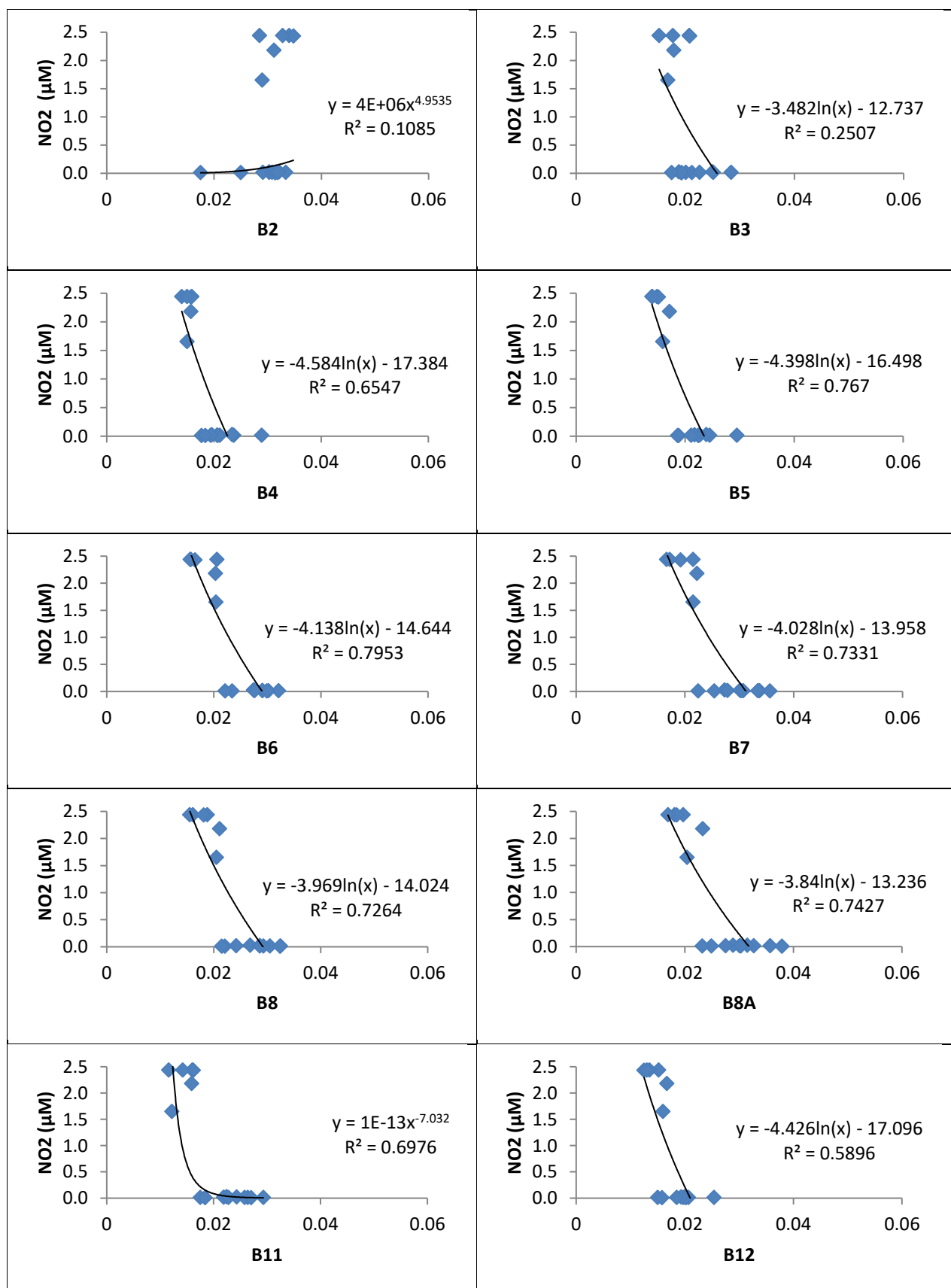
Σχήμα 3.33: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης πυριτικών (SiO_2) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



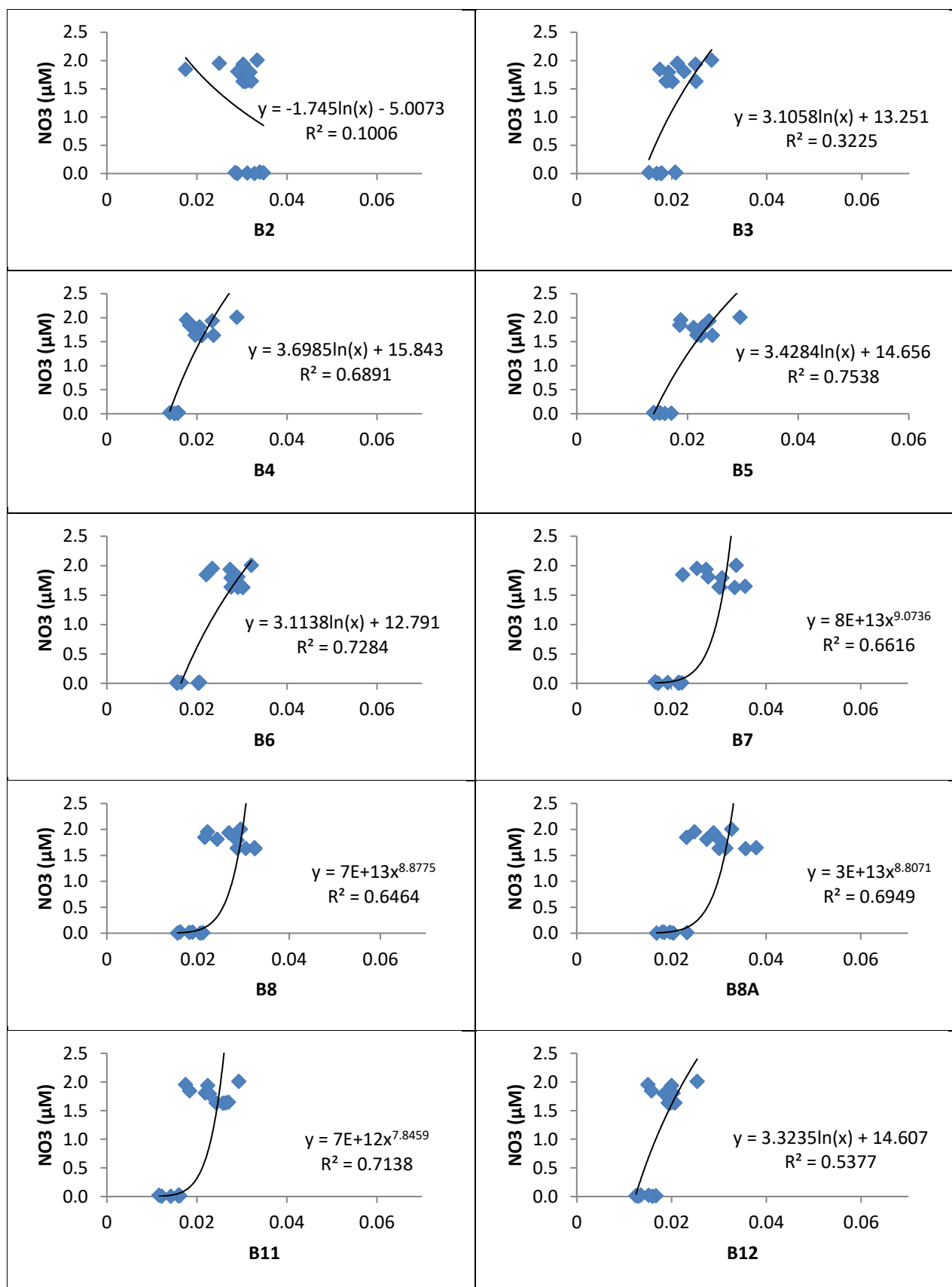
Σχήμα 3.34: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου (TIN) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 10 m.



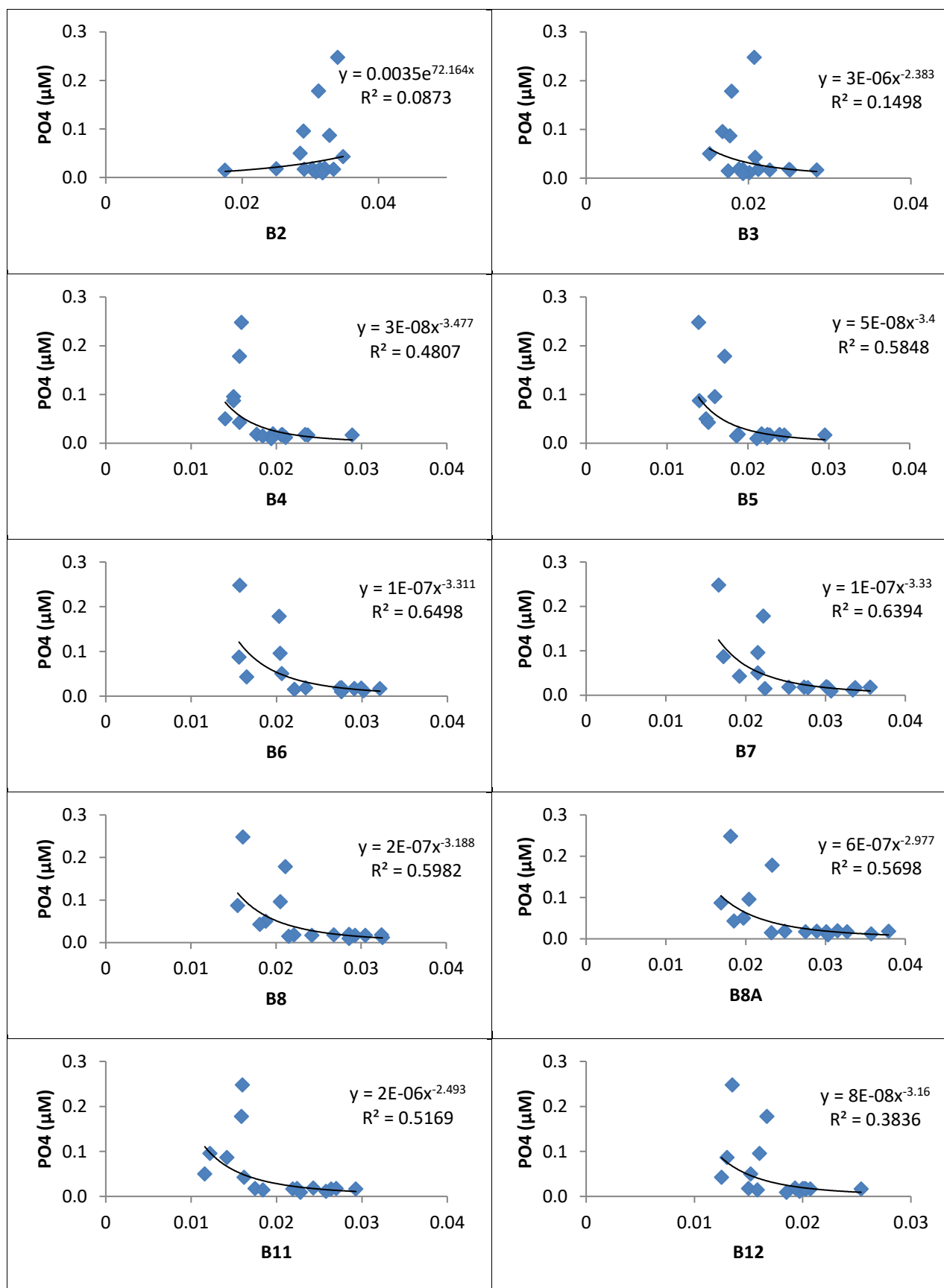
Σχήμα 3.35: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης αμμωνιακών (NH_4) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.



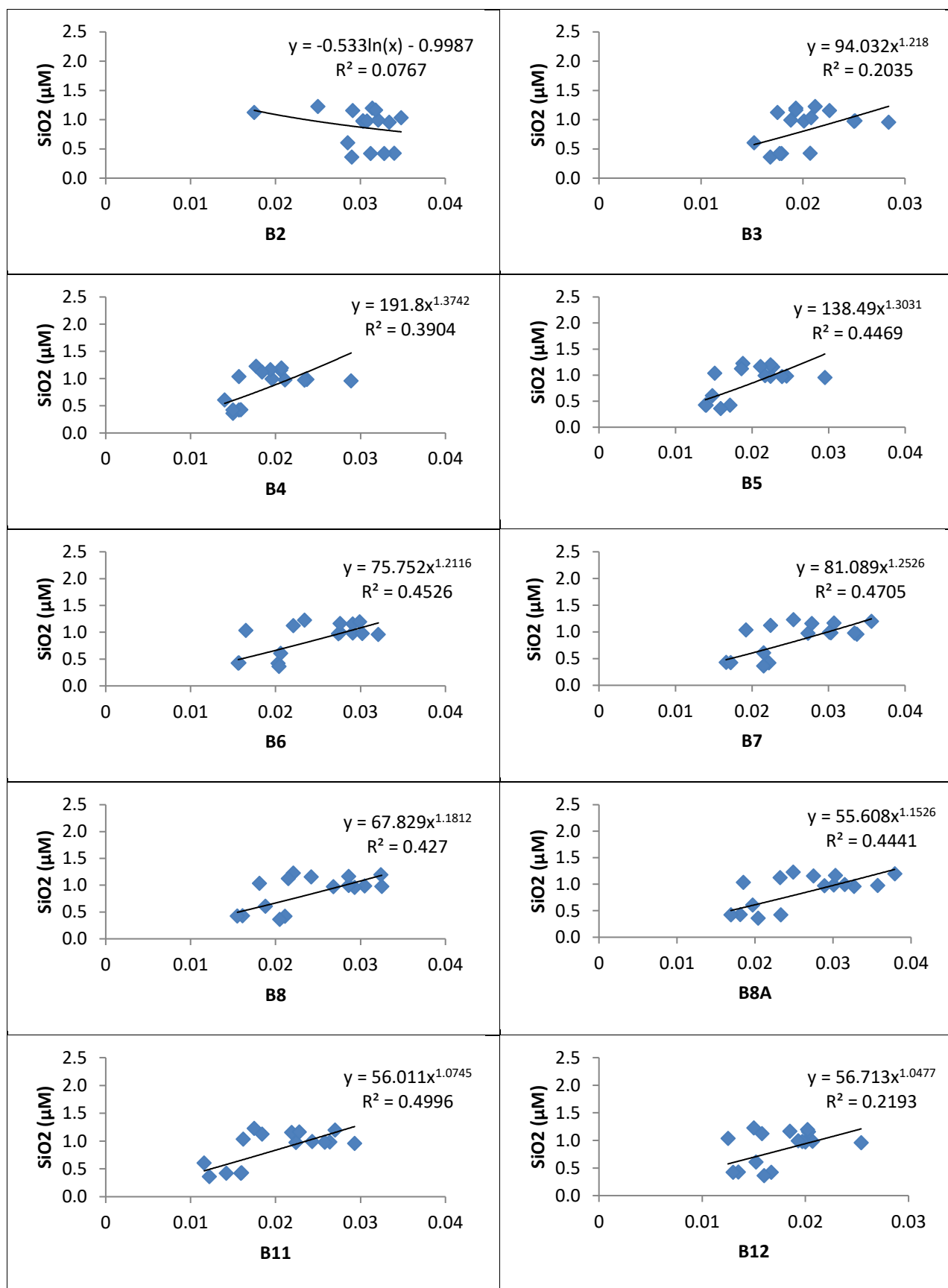
Σχήμα 3.36: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρωδών (NO₂) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.



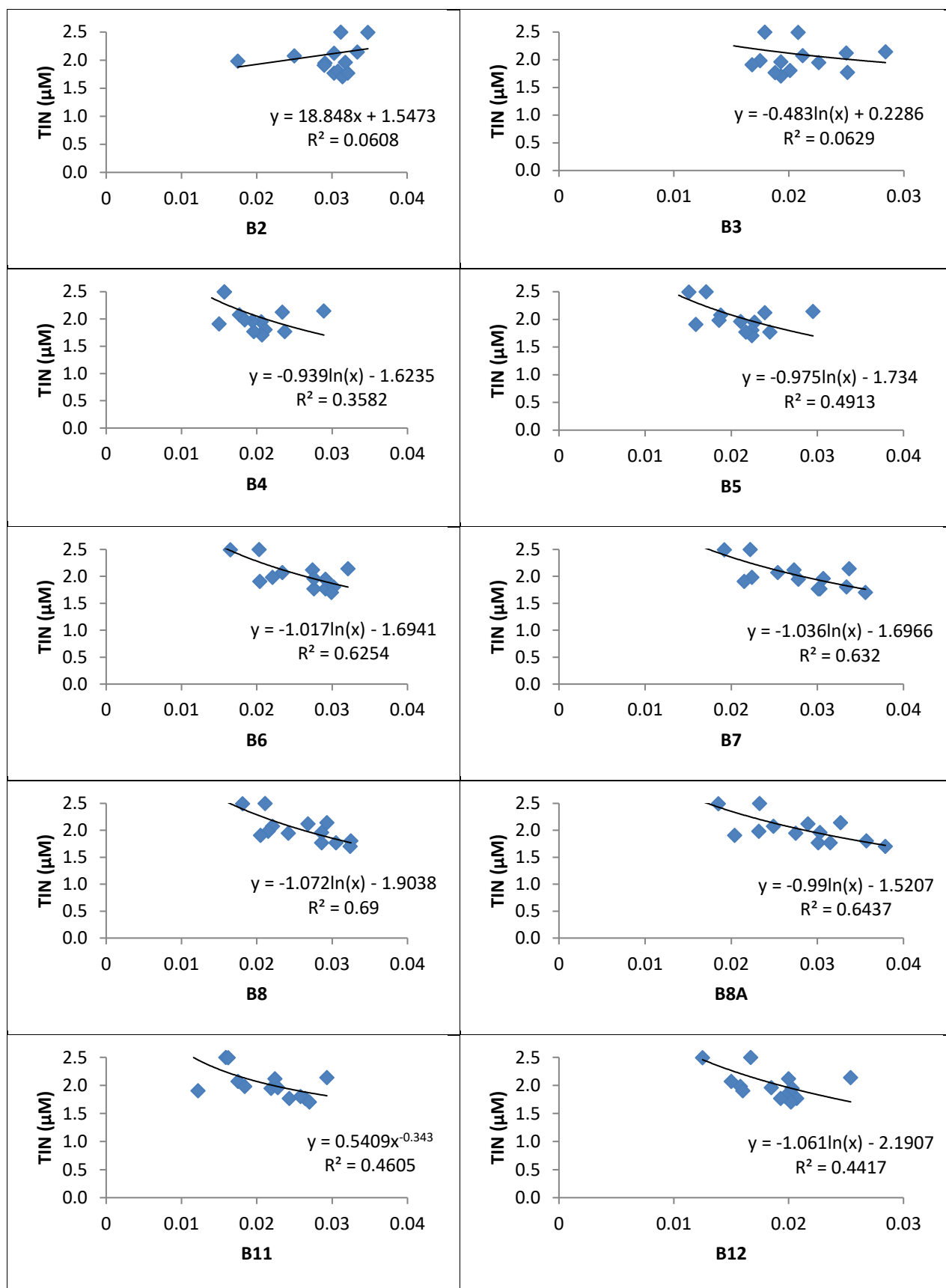
Σχήμα 3.37: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρικών (NO₃) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.



Σχήμα 3.38: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης φωσφορικών (PO₄) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.



Σχήμα 3.39: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης πυριτικών (SiO_2) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.



Σχήμα 3.40: Γραφικές παραστάσεις συσχέτισης συγκέντρωσης ολικού ανόργανου αζώτου (TIN) και ανάκλασης σε διαφορετικά μήκη κύματος στα 20 m.

μέγιστο (0,65) στο φασματικό κανάλι B6. Το ολικό ανόργανο άζωτο παρουσίασε και πάλι πολύ χαμηλό συντελεστή συσχέτισης σε όλα τα φασματικά κανάλια το οποίο, χωρίς να ξεπεράσει το 0,02.

- ο συντελεστής συσχέτισης στα 10 m για τα αμμωνιακά κυμάνθηκε πολύ χαμηλά σε όλα τα φασματικά κανάλια και η τιμή του δεν ξεπέρασε το 0,05. Τα νιτρώδη παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,13) και μέγιστο (0,78) στο B5 και B6. Τα νιτρικά είχαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,12) και μέγιστο (0,77) στο φασματικό κανάλι B5. Τα φωσφορικά εμφάνισαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B3 (0,13) και μέγιστο (0,77) στο B6. Τα πυριτικά έδειξαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,12) και μέγιστο (0,52) στο φασματικό κανάλι B7. Το ολικό ανόργανο άζωτο παρουσίασε ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,11) και μέγιστο (0,62) στο B6.
- ο συντελεστής συσχέτισης στα 20 m για τα αμμωνιακά κυμάνθηκε πολύ χαμηλά σε όλα τα φασματικά κανάλια και δεν ξεπέρασε το 0,05. Τα νιτρώδη παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,10) και μέγιστο (0,79) στο B6. Τα νιτρικά είχαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,10) και μέγιστο (0,75) στο φασματικό κανάλι B5. Τα φωσφορικά παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,07) και μέγιστο (0,49) στο B11. Τα πυριτικά παρουσίασαν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,07) και μέγιστο (0,49) στο φασματικό κανάλι B11. Το ολικό ανόργανο άζωτο παρουσίασε ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης στο B2 (0,06) και μέγιστο (0,69) στο B8.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με την αύξηση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και της βιομηχανικής ανάπτυξης αλλοιώνεται δραματικά η ποιότητα των υδάτων. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να παρακολουθούνται οι παράμετροι ποιότητας των υδάτων, για τη διασφάλιση της διατήρησης ενός αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισής τους. Έχει ερευνηθεί διεξοδικά η δυνατότητα χρήσης της τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων.

Η τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) παρέχει αποτελεσματικά, οικονομικά εργαλεία για την παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων, καθώς και των παραμέτρων τους σε παράκτια ύδατα, σε λίμνες και ποτάμια. Η πρόοδος στη χρήση της τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση του χερσαίου περιβάλλοντος και γενικότερα των φυσικών πόρων, εμφανίζεται εφικτή λόγω των βελτιωμένων διακριτικών ικανοτήτων των δορυφορικών δεδομένων, στη συχνότητα ανάκτησης δεδομένων, καθώς και στη δυνατότητα επεξεργασίας τους. Τα δεδομένα αυτά είναι αρκετά χρήσιμα και μπορούν να αξιοποιηθούν σε αρκετές περιοχές για την παρακολούθηση διαφορετικών παραμέτρων των υδάτων (Ennaji *et al.* 2018). Ωστόσο, αντιμετωπίζονται μεγάλοι περιορισμοί κυρίως στην αλληλεπίδραση του φωτός στα ρηχά νερά και γενικότερα λόγω της πολυπλοκότητας του παράκτιου περιβάλλοντος (Lim & Choi 2015).

Παρόλα αυτά, παλαιότερες έρευνες ασχολήθηκαν με την ποιότητα εσωτερικών υδάτων όπως για παράδειγμα λιμνών και ποταμών και χρησιμοποίησαν δεδομένα άλλων δορυφόρων π.χ. του Landsat 8 για τη διερεύνηση παραμέτρων όπως τα αιωρούμενα στερεά, χλωροφύλλη-α, ολικό άζωτο, ολικός φωσφόρος, θολερότητα και θερμοκρασία (Akbar *et al.* 2010, Lim & Choi 2015, Gholizadeh *et al.* 2016).

Οι Toming *et al.* (2016), Liu *et al.* (2017) και Karaoui *et al.* (2019), πραγματοποίησαν μια πρώτη προσέγγιση για την διερεύνηση της ποιότητας των υδάτων με το δορυφόρο Sentinel-2, οι οποίοι μελέτησαν διάφορες παραμέτρους σε εσωτερικά ύδατα λιμνών, π.χ. χλωροφύλλη-α, οργανική ύλη, διαλυμένο οργανικό άνθρακα, αιωρούμενα σωματίδια, φωσφόρο και άζωτο.

4.1 Φασματικές υπογραφές των σημείων δειγματοληψίας

Οι παράκτιες υδατοκαλλιέργειες, και ιδιαίτερα οι ιχθυοκαλλιέργειες, παράγουν απόβλητα που χαρακτηρίζονται από μεγάλο ποσοστό N και P σε διαλυμένη μορφή μέσα στη στήλη του νερού (La Rosa *et al.* 2002). Τα φυσικά χαρακτηριστικά και η σύσταση του νερού επηρεάζουν το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος. Κάθε επιφάνεια έχει διαφορετική φασματική υπογραφή και μας επιτρέπει να διακρίνουμε τη διαφοροποίηση μιας περιοχής από μια άλλη, καθώς και τις ιδιότητές της (Καρτάλης & Φειδάς 2015).

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη φασματική υπογραφή του νερού είναι η θολερότητα που μπορεί να υπάρχει και να οφείλεται σε ρύπους και ιζήματα. Επίσης, άλλοι παράγοντες είναι η περιεκτικότητα του νερού σε φυσικοχημικές παραμέτρους, με αποτέλεσμα η φασματική υπογραφή του νερού να αυξάνεται ή να μειώνεται στο μήκος κύματος (Περάκης και συν. 2015).

Στην παρούσα έρευνα, παρατηρήθηκε ότι στην ορατή περιοχή η μορφή των φασματικών υπογραφών παρουσίασε, γενικά, μικρή ανάκλαση με απορρόφηση προς την κόκκινη περιοχή του φάσματος. Ωστόσο, τα σημεία S2, S4 και S7 στις Νηές και S2, S3 και S4 στη Μηλίνα, παρουσίασαν αρκετά μεγαλύτερες ανακλάσεις από τα υπόλοιπα σημεία, καθώς είναι σημεία που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς, οι οποίοι επηρεάζουν αρκετά τις ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας.

Επίσης, το σημείο S11 στις Νηές, το οποίο λειτούργησε ως μάρτυρας, παρουσίασε μικρότερη ανάκλαση από τα άλλα σημεία δειγματοληψίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το βάθος του σημείου αυτού είναι περίπου 70 m και πιθανόν να μην επηρεάζεται από την ανάκλαση του πυθμένα.

4.2 Συντελεστής συσχέτισης και γραμμές παλινδρόμησης

Με μία πρώτη προσέγγιση στην παρούσα έρευνα, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής συσχέτισης όλων των παραμέτρων αυξάνει προς το κοντινό υπέρυθρο φάσμα. Ειδικότερα, τα μεγαλύτερα ποσοστά συσχέτισης εμφανίστηκαν κυρίως από τα νιτρώδη και τα νιτρικά, στα φασματικά κανάλια B5, B6, B7 και B8. Επίσης, στο ορατό φάσμα εμφανίστηκε αύξηση της συσχέτισης των παραμέτρων κυρίως στο κανάλι B4, σε όλα τα βάθη όπως στα νιτρώδη, στα νιτρικά και στα φωσφορικά.

Οι Zhou *et al.* (2006), διερεύνησαν σε εσωτερικά ύδατα τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών με το δορυφόρο Landsat 5 και διαπίστωσαν ότι στη φασματική ζώνη του κοντινού υπέρυθρου (780 έως 2500 nm), παρουσιάσθηκε μεγάλη συσχέτιση. Συνεπώς, η μπλε φασματική ζώνη έχει αρκετά αυξημένη συσχέτιση με τα αιωρούμενα στερεά και θα μπορούσε να είναι κατάλληλη για την εκτίμησή τους, εκτός από συνθήκες όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση φυτοπλαγκτού (Dekker *et al.* 2002). Επίσης, σε μια άλλη έρευνα οι Ritchie *et al.* (1976), έδειξαν ότι η πιο χρήσιμη περιοχή φάσματος για τον προσδιορισμό αιωρούμενων σωματιδίων στα επιφανειακά νερά ήταν μεταξύ 700 και 800 nm. Επιπλέον, η συγκέντρωσή της διαλυμένης οργανικής ύλης επηρεάζει κυρίως τις τιμές ανάκλασης στη μπλε και πράσινη περιοχή του φάσματος και συνήθως χρησιμοποιούνται ως αντιπροσωπευτικά στα 440 nm (Nelson & Siegel 2002).

Στην παρούσα έρευνα οι μεγαλύτερες συσχετίσεις όλων των παραμέτρων παρουσιάστηκαν κυρίως στα φασματικά κανάλια B5 και B6. Παρόμοια έρευνα των Lim & Choi (2015), που επεξεργάστηκε δεδομένα για την εκτίμηση παραμέτρων στην οποία χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί καναλιών, δηλαδή πολλαπλή παλινδρόμηση, έδειξαν ότι το φασματικό κανάλι B5 συσχετίζεται αρκετά με όλες τις παραμέτρους ποιότητας των υδάτων.

Πιο συγκεκριμένα τα αμμωνιακά παρουσίασαν υψηλότερο R^2 στα φασματικά κανάλια B5 και B6 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) στα 0 και 5 m, ενώ οι τιμές του R^2 στα 10 και 20 m ήταν αρκετά χαμηλές. Για τα νιτρώδη, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B5 και B6 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) στα 0 και 5 m, ενώ στα 10 και 20 m στα φασματικά κανάλια B5, B6 και B8A. Για τα νιτρικά, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B4, B5, B6 και B7 στα 0, 5 και 10 m, ενώ στα 20 m υψηλότερες τιμές του R^2 εμφανίστηκαν στα B5 και B6, δηλαδή στο ορατό φάσμα μέσω του καναλιού B4 και στο κοντινό υπέρυθρο μέσω των υπολοίπων καναλιών. Το ολικό άζωτο (TN) από την έρευνα των Lim & Choi (2015) παρουσίασε σημαντικές συσχετίσεις σε συνδυασμούς καναλιών που περιείχαν το κανάλι B5, καθώς και μικρή συσχέτιση στα κανάλια 2 και 3 του ορατού φάσματος.

Για τα φωσφορικά, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B6 και B7 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) σε όλα τα βάθη. Τα φωσφορικά μπορεί να σχετίζονται άμεσα με τη βιομάζα του φυτοπλαγκτού, η οποία συνήθως υπολογίζεται με τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α και έμμεσα σχετίζεται με τη διαύγεια των υδάτων (Swanson & Zurawell 2006). Ο ολικός φώσφορος (TP), ο οποίος μαζί με το ολικό άζωτο θεωρούνται περιοριστικοί παράγοντες ανάπτυξης της πρωτογενούς παραγωγής σε ένα υδάτινο οικοσύστημα αποτελούν σημαντικές

παραμέτρους για τον προσδιορισμό του ευτροφισμού. Οι φασματικές ζώνες όπως η πράσινη από 545 έως 565 nm και η ενσωμάτωση του κόκκινου από 620 έως 670 nm παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με τον ολικό φώσφορο (Wu *et al.* 2009).

Οι οπτικές ιδιότητες του ολικού φωσφόρου δεν είναι τόσο σαφείς όσο του ολικού αζώτου στο νερό. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης των Lim & Choi (2015), έδειξαν ότι ο ολικός φώσφορος παρουσίασε την ισχυρότερη συσχέτιση με τη φασματική ζώνη 5. Ο ολικός φώσφορος έχει παρόμοιο χωρικό πρότυπο με τη χλωροφύλλη-*a*, γιατί μπορεί να σχετίζεται άμεσα με τη βιομάζα του φυτοπλαγκτού και τη συγκέντρωση χλωροφύλλης-*a* και έμμεσα με τη διαύγεια ή τη διαφάνεια του νερού (Haji *et al.* 2016). Σε παρόμοια έρευνα εσωτερικών υδάτων με δεδομένα του Sentinel-2, οι Toming *et al.* (2016) υποστήριξαν ότι η μέγιστη συσχέτιση της χλωροφύλλης-*a*, παρατηρήθηκε στο εύρος των 665-740 nm, δηλαδή προς το κοντινό υπέρυθρο.

Για τα πυριτικά, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B6 και B7 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) σε όλα τα βάθη. Τέλος, για το ολικό ανόργανο άζωτο (TIN), στα 0 και 5 m οι τιμές του R^2 ήταν πολύ χαμηλές, ενώ στα 10 και 20 m μεγαλύτερες τιμές σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B6 και B7 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα). Λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν αντίστοιχες έρευνες με τις φυσικοχημικές παραμέτρους τις παρούσας έρευνας, είναι δύσκολο να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Μια ακόμη έρευνα των Politi *et al.* (2017), που πραγματοποιήθηκε σε εσωτερικά ύδατα στον Καναδά, παρουσίασε ότι η κόκκινη περιοχή του φάσματος χρησιμοποιείται συχνά για να χαρτογραφηθεί η θολερότητα ή ένας συνδυασμός κυανών και κόκκινων ζωνών. Παρομοίως, οι Liu *et al.* (2017) μελέτησαν εσωτερικά ύδατα της λίμνης Poyang στην Κίνα με τη χρήση του δορυφόρου Sentinel-2 και

παρατήρησαν ότι τα μοντέλα παλινδρόμησης που έχουν ως βάση το φασματικό κανάλι B5, B6 και B7 παρουσίασαν υψηλότερο R^2 . Επίσης, τα μοντέλα που είχαν ως βάση το φασματικό κανάλι B1, B2 και B3 εμφάνισαν αρκετά χαμηλό R^2 και επέλεξαν περαιτέρω κανάλια όπως το B4 και B8b τα οποία έδειξαν σχετικά χαμηλό R^2 .

Τα μοντέλα που διερευνήθηκαν για την εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων, είναι βασισμένα στην τηλεπισκόπηση. Έχουν ως κύριο στόχο την ενσωμάτωση και τη συσχέτιση των δορυφορικών δεδομένων, με τα δεδομένα από επίγειες μετρήσεις. Αυτά τα μοντέλα, που βρίσκονται ακόμη υπό διερεύνηση, θα είναι εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία για την καλύτερη μελέτη και επεξεργασία δεδομένων των υδάτινων οικοσυστημάτων και πιο συγκεκριμένα στις παράκτιες περιοχές με ιχθυοκαλλιεργητική δραστηριότητα. Η παρούσα εργασία στηριζόμενη στα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών προσπάθησε να εκτιμήσει πιθανές ομοιότητες που υπάρχουν μεταξύ τους. Μελλοντικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες περιοχές με ιχθυοκαλλιεργητικές μονάδες, περισσότερα σημεία δειγματοληψίας σε κάθε περιοχή και μεγαλύτερη χρονοσειρά δεδομένων.

Επίσης, ενώ ο πυθμένας των δύο περιοχών έρευνας είχε τα ίδια χαρακτηριστικά ως προς τη σύσταση, οι δύο περιοχές διέφεραν σημαντικά σε σχέση με το βάθος. Άρα μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα σημεία με το ίδιο βάθος και είδος πυθμένα για βελτίωση των αποτελεσμάτων και τον έλεγχο της πιθανής επίδρασης των δυο αυτών παραμέτρων στην ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και άλλες τεχνικές ανάλυσης όπως η πολλαπλή παλινδρόμηση, καθώς και συνδυασμός διαφόρων καναλιών.

Τέλος, φαίνεται πως η τηλεπισκόπηση μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην επιχειρησιακή παρακολούθηση των θρεπτικών αλάτων σε περιοχές που

δραστηριοποιούνται ιχθυοκαλλιέργειες, καθώς τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι πολύ ενθαρρυντικά.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι σταθμοί κοντά στους ιχθυοκλωβούς φαίνεται πως επηρεάζουν τις φασματικές ανακλάσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που καταγράφονται από τον δορυφόρο.
- Στην ορατή περιοχή η μορφή των φασματικών υπογραφών παρουσίασε, γενικά, μικρή ανάκλαση με απορρόφηση προς την κόκκινη περιοχή του φάσματος.
- Με τη χρήση του συνδυασμού των φασματικών καναλιών των 10 και 20 m χωρικής διακριτικής ικανότητας, αποτυπώθηκαν καλύτερα οι διακυμάνσεις της ανάκλασης στο κοντινό υπέρυθρο.
- Η συσχέτιση των θρεπτικών αλάτων αυξάνει σε όλα τα βάθη όταν δεν λαμβάνονται υπόψη οι μετρήσεις που βρίσκονται κοντά σε ιχθυοκλωβούς.
- Στο ορατό φάσμα, παρατηρήθηκε μια αύξηση της συσχέτισης των παραμέτρων κυρίως στο κανάλι B4, σε όλα τα βάθη όπως των νιτρωδών, των φωσφορικών και των νιτρικών.
- Οι χαμηλότερες τιμές συσχέτισης για όλα τα θρεπτικά συστατικά, εμφανίστηκαν στην ορατή περιοχή του φάσματος.
- Οι υψηλότερες τιμές συσχέτισης για όλα τα θρεπτικά συστατικά, εμφανίστηκαν στο κοντινό και μέσο υπέρυθρο φάσμα.
- Η ανάλυση της παλινδρόμησης έδειξε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) για τις γραμμές τάσης όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν, παρουσίασε αύξηση προς το κοντινό υπέρυθρο, κυρίως στα φασματικά κανάλια B5, B6 και B7.
- Τα αμμωνιακά παρουσίασαν υψηλότερο R^2 στα φασματικά κανάλια B5 και B6 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) στα 0 και 5 m, ενώ οι τιμές του R^2 στα 10 και 20 m ήταν αρκετά χαμηλές.

- Για τα νιτρώδη, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B5 και B6 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) στα 0 και 5 m, ενώ στα 10 και 20 m στα φασματικά κανάλια B5, B6 και B8A.
- Για τα φωσφορικά, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B6 και B7 (δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα) σε όλα τα βάθη.
- Για τα νιτρικά, μεγαλύτερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα φασματικά κανάλια B4, B5, B6 και B7 στα 0, 5 και 10 m, ενώ στα 20 m υψηλότερες τιμές του R^2 σημειώθηκαν στα B5 και B6, δηλαδή στο ορατό φάσμα μέσω του καναλιού B4 και στο κοντινό υπέρυθρο μέσω των υπολοίπων καναλιών.
- Το ολικό ανόργανο άζωτο παρουσίασε πολύ χαμηλό R^2 σε όλα τα φασματικά κανάλια και σε όλα τα βάθη.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Ιωακειμίδης Σ. (2012). Χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών για την παρακολούθηση, πρόληψη και αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, 94 σελ.

Καρτάλης Κ., Φειδάς Χ. (2015). Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, 610 σελ.

Κλαουδάτος Σ., Κλαουδάτος Δ. (2010). Κατασκευές υδατοκαλλιεργητικών συστημάτων Θαλάσσιες – Λιμνοθαλάσσιες – Χερσαίες. Προπομπός, 230 σελ.

Κλαουδάτος Σ., Χατζηστεφάνου Μ. (1996). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και Μελέτες αξιολόγησης σε συστήματα καλλιέργειας πλωτών κλωβών στην Ελλάδα. « Σύμπραξη στη Διαχείριση παράκτιας ζώνης». Σαμαρά. 533 σελ.

Παπαδημητρίου Κ. (2017). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ιχθυοκαλλιέργειας στα θρεπτικά άλατα της υδάτινης στήλης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 100 σελ.

Παρχαρίδης Ι. (2015). Αρχές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Θεωρία και εφαρμογές. ΣΕΑΒ. 182 σελ.

Περάκης Κ., Μουσιάδης Α., Φαρασλής Ι. (2015). Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και Τηλεπισκόπηση, Κάλλιπος, 231 σελ.

Πετράκης Γ. (2000). Ανάπτυξη Ολοκληρωμένης Πολιτικής για την Αειφόρο Διαχείριση του Παγασητικού Κόλπου. Τελική Έκθεση, ΕΚΘΕ.

Φλώρου Μ. (2017). Επιπτώσεις ιχθυοκαλλιέργειας στα θρεπτικά άλατα του Παγασητικού κόλπου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 100 σελ.

Ψωμιάδης Ε., Παπάζογλου Γ., Αντωνίου Β., Καυκαλά Ε. (2017). Δεδομένα των δορυφόρων SENTINEL-1 & SENTINEL-2 για τη χρήση χαρτογράφησης της λεκάνης απορροής και της παράκτιας ζώνης Σπερχειού ποταμού στην ανατολική Στερεά Ελλάδα, 2^ο Συνέδριο Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Χωρικής Ανάλυσης στη Γεωργία και στο Περιβάλλον, Αθήνα, 25 & 26 Μαΐου 2017. ISBN: 978-960-6806-21-6.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Akbar T. A., Hassan Q. K., Achari G. (2010). A remote sensing based framework for predicting water quality of different source waters. The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 38 p.

Alparslan E., Aydoğan C., Tufekci V., Tüfekci H. (2007). Water quality assessment at Ömerli Dam using remote sensing techniques. Environ Monitoring Assess. 135: 391–398.

Astaras T., (1994). The present state of Remote Sensing applications to geological science in Greece. International Journal of Remote Sensing. 15 (6): 1251-1258.

Behrenfeld M., Falkowski P. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration. Limnology Oceanography. 42(1): 1–20.

Binding, C.E., Greenberg T.A., McCullough G., Watson S.B., Page E. (2018). An analysis of satellite-derived chlorophyll and algal bloom indices on Lake Winnipeg. Journal of Great Lakes Research. 44(3): 436-446.

Binding C.E., Greenberg T.A., Watson S.B., Rastin S., Gould J. (2015). Long term water clarity changes in North America's Great Lakes from multi-sensor satellite observations. Limnology Oceanography. 60: 1976–1995.

Brando V., Phinn S. (2007). Coastal Aquatic Remote Sensing Applications for Environmental Monitoring and Management, Journal of Applied Remote Sensing. 1, 011599. 6 p.

Brekke, C., Solberg A.H.S. (2005). Oil spill detection by satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment. 95(1): 1–13.

Brezonik P., Olmanson L., Finlay J., Bauer M. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. Remote Sens. Environ. 157: 199–215.

Campbell G., (2013). Remote sensing of algal blooms in inland waters using the matrix inversion method and semi-empirical algorithms. In: *Advances in Mapping from Remote Sensor Imagery*. Taylor & Francis (CRC Press). p.279–308.

Clark J., Schaeffer B.A., Darling J., Urquhart E., Johnston J., Ignatius A., Myer M., Loftin K. Werdell P.J., Stumpf R. (2017). Satellite monitoring of cyanobacterial harmful algal bloom frequency in recreational waters and drinking water sources. *Ecological Indicators*. 80: 84-95.

Congedo L. (2018). Semi-automatic classification documentation. Release of 5.3.6.1. 223 p.

Dekker A., Vos R., Peters S.W. (2002). Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International Journal of Remote Sensing*. 23(1): 15–35.

Dekker A., Anstee J., Phinn S. Bisset P., Brando V., Casey B., Fearn P., Hedley J., Klonowski W., Lee Z., Lynck M., Lyons M., Mobley C., Roelfsema C. (2011). Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology Oceanography. Methods*. 9: 396–425.

Dogliotti, A., Ruddick K., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing Environment*. 156: 157–168.

Doron M., Babin M., Hembise O., Mangin A., Garnesson P. (2011). Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and Sea WiFS data. *Remote Sensing Environment*. 115(12): 2986–3001.

Doxaran D., Froidefond J. M., Castaing P. (2003). Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios. *Applied Optics*. 42(15): 2623-2634.

Duarte C., Holmer M., Olsen Y., Soto D., Marbà N., Guiu J., Black K., Karakassis I. (2009). Will oceans help feed humanity? *Bio Science*. 59(11):967–976.

Ennaji W., Barakat A., Karaoui I., El Baghdadi M., Arioua A., (2018). Remote sensing approach to assess salt-affected soils in the north-east part of Tadla plain, Morocco. *Geology, Ecology and Landscapes* 2(1): 22-28.

FAO (2016). Food and Agricultural Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture. Aquaculture Big Numbers. Paper No. 601. Rome, Italy.

FAO (2018). Food and Agricultural Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture. Meeting the Sustainable Development Goals. Rome, Italy.

Filstrup C., Wagner T., Soranno P., Stanley E., Stow C., Webster K., Downing J.(2014). Regional variability among nonlinear chlorophyll–phosphorus relationships in lakes. *Limnology Oceanography*. 59(5): 1691–1703.

Gholizadeh M.H., Melesse A.M., Reddi L., (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors* 16(8): 1298p.

Gower J., Hu C., Borstad G., King S. (2006). Ocean color satellites show extensive lines of floating sargassum in the Gulf of Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 44 (12): 3619–3625.

Greb S., Dekker A., Binding C. (2018). Earth Observations in Support of Global Water Quality Monitoring. Reports and Monographs of the International Ocean Colour Coordinating Group. (17): 132 p.

Halwart M., Soto D., Arthur J. R. (2007). Cage aquaculture-Regional reviews and global overview. *FAO Fisheries Technical Paper*. No. 498, 241 p.

Han B., Loisel H., Vantrepotte V., Mériaux X., Bryère, P., Ouillon S., Dessailly D., Xing Q., Zhu J. (2016). Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters. *Remote Sensing*. 8(3): 211 p.

Heipke C., Madden M., Li Z., Dowman I. (2016). Theme issue “State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science”.*ISPRS Journal of Photometry and Remote Sensing*. 115: 1-152.

Hu C. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing Environment*. 113(10): 2118–2129.

Kahru M. (2017). Ocean productivity from space: Commentary. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31(1): 214–216.

Karaoui I., Boudhar A., Arioua A., Hssaisoune M., Mouatassime S., Ait Ouhamchich K, Elhamdouni D., Nouaim W. (2019). Evaluating the potential of Sentinel-2 satellite images for water quality characterization of artificial reservoirs: The Bin El Ouidane Reservoir case study (Morocco). *Meteorology Hydrology and Water management* 7(1): 31-39.

Kennedy R., Townsend P., Gross J., Cohen W., Bolstad P., Adams P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment*. 113(7): 1382-1396.

Khorram S., Cheshir H., Geraci A., La Rosa G. (1991). Water quality mapping of Augusta Bay, Italy from Landsat-TM data. *Remote Sensing* 12(4): 803-808.

Kloiber S.M., Anderle T., Brezonik P.L., Olmanson L.G., Bauer M.E., Brown D. (2000). Trophic state assessment of lakes in the Twin Cities (Minnesota, USA) region

by satellite imagery. *Archive Hydrobiologie Special Issues Advances in Limnology*. 55: 137-151.

La Rosa T., Mirto S., Favaloro E., Savona B., Sarà G., Danovaro R., Mazzola A. (2002). Impact on the water column biogeochemistry of a Mediterranean mussel and fish farm. *Water Research*, 36(3): 713–721.

Lee Z., Carder K., Arnone R., He M. (2007). Determination of primary spectral bands for remote sensing of aquatic environments. *Sensors* 7(12) : 3428–3441.

Lee Z.P., Darecki M., Carder K., Davis C., Stramski D., Rhea W.J. (2005). Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods. *Journal of Geophysical Research* 110: 1–10.

Lee Z.P. (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals. Tests of Algorithms and Applications. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. 126 p.

Leiper I., Phinn S., Roelfsema C., Joyce K., Dekker A. (2014). Mapping coral reef benthos, substrates, and bathymetry, using compact airborne Spectrographic Imager (CASI) data. *Remote Sensing* 6:7, 6423–6445.

Lillesand T., Kiefer R., Chipman J. (2005). *Sensing and Image Interpretation*. Wiley 750p.

Lim J., Choi M. (2015). Assessment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea. 187(6): 384.

Liu H., Li Q., Shi T., Hu S., Wu G., Zhou Q. (2017). Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing* 9(7): 761-780.

Lougeay R., Miller T., Brazel A.J. (1987). Monitoring changing desert biomass through video digitization of Landsat MSS data: an application to dust storm generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 53(9): 1251-1254.

Mannino A., Novak M., Hooker S., Hyde K., Aurin D. (2014). Algorithm development and validation of CDOM properties for estuarine and continental shelf waters along the northeastern U.S. coast. *Remote Sensing Environment*. 152: 576–602.

Matthews M.W., Bernard S., Robertson L. (2012). An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*. 124: 637–652.

Michler-Cieluch T., Kodeih S. (2008). Mussel and seaweed cultivation in offshore wind farms: an opinion survey. *Coastal Management*. 36(4): 392–411.

- Nas B., Ekercin S., Karabörk H., Berktaş A., Mulla D.J. (2010). An Application of Landsat-5TM Image Data for Water Quality Mapping in Lake Beyşehir, Turkey. *Water Air Soil Pollution*. 212(14): 183–197.
- Nelson N., Siegel D. (2002). Chromophoric DOM in the open ocean. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, Academic Press. Chapter 11: 547–578.
- Olmanson L., Bauer M., Brezonik P. (2008). A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing Environment*. 112(11): 4086–4097.
- Politi E., Prairie Y. (2017). The potential of Earth Observation in modelling nutrient loading and water quality in lakes of southern Québec, Canada. *Aquatic Sciences* (2018) 80:8. 16 p.
- Reynolds R., Smith T., Liu C., Chelton D., Casey K., Schlax M. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*. 20(22): 5473–5496.
- Ritchie, J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R. (1976). Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 42(12): 1539–1545.
- Sathyendranath S., Prieur L., Morel A. (1989). A three- component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*. 10(8): 1373-1394.
- Shridhar J., Somashekhar V., Alvarinho L. (2015). A Synoptic Review on Deriving Bathymetry Information Using Remote Sensing Technologies: Models, Methods and Comparisons. *Advances in Remote Sensing. Scientific Research*. 4(2): 147-162.
- Shuchman R., Sayers M., Brooks C. (2013). Mapping and monitoring the extent of submerged aquatic vegetation in the Laurentian Great Lakes with multi-scale satellite remote sensing. *Journal of Great Lakes Research*. 39(S1): 78–89.
- Stumpf R., Davis T., Wynne T., Graham J., Loftin K., Johengen T., Gossiaux D., Palladino D., Burtner A. (2016). Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria. *Harmful Algae* 54: 160–173.
- Stumpf R., Pennock J. (1989). Calibration of a general optical equation for remote sensing of suspended sediments in a moderately turbid estuary. *Journal of Geophysical Research Oceans* 94(C10): 14363–14371.
- Stumpf R., Wynne T., Baker D., Fahnenstiel G. (2012). Interannual variability of cyanobacterial blooms in Lake Erie. *PLoS ONE* 7(8): e42444.
- Swanson H., Zurawell R. (2006). Lake Newell Reservoir water quality monitoring report. Provincial parks lake monitoring program. Alberta Environment 614 p.

Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T. (2016). First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing* 8(8): p640.

Urquhart E., Schaeffer B., Stumpf R., Loftin K., Werdell P. (2017). A method for examining temporal changes in cyanobacterial harmful algal bloom spatial extent using satellite remote sensing. *Harmful Algae* 67: 144–152.

Vahtmäe E., Kutser T. (2007). Mapping bottom type and water depth in shallow coastal waters with satellite remote sensing. *Journal of Coastal Research*. 50(50): 185–189.

Valderrama D., Hishamunda N., Zhou X.W. (2010). Estimating Employment in World Aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 45: 24-25.

Wang F., Han L., Kung H.-T., Van Arsdale R.B. (2006). Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. *International Journal of Remote Sensing*. 27(23): 5269-5283.

Wu M., Zhang W., Wang X., Luo D. (2009). Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China. *Environmental Monitoring and Assessment* 148(1-4): 255–264.

Wu Z.Z., Che Z.W., Wang Y.S., Dong J.D., Wu M.L. (2015). Identification of Surface Water Quality along the Coast of Sanya, South China Sea. *PLoS ONE* 10(4): e0123515. 13p.

Zhou W., Wang S., Zhou Y., Troy A. (2006). Mapping the concentrations of total suspended matter in Lake Taihu, China, using Landsat 5 TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 27(6): 1177–1191.

Zhou Y., Michalak A., Beletsky D., Rao Y., Richards P. (2015). Record-breaking Lake Erie hypoxia during 2012 drought. *Environmental Science and Technology* 49(2): 800–807.

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description/orbit>
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>
- <http://ebooks.edu.gr>
- *User Guides - Sentinel-2 MSI*
- <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

ABSTRACT

The observation of water column and the estimation of physicochemical parameters, at areas where fish farms are operating, is always achieved by in situ sampling, which is a time-consuming and costly process, especially when replications are required. The science of remote sensing can significantly contribute in environmental monitoring and quantifying of physicochemical parameters. Over the last decades, the progress in remotely sensed sensors and data processing can contribute in information extraction from satellite data for monitoring and assessment. Uptill now, the in situ measurements are the most accurate and there is a need for a model development based on remotely sensed data to be operational in order to be proved a useful tool for observing coastal environment, where fish farms are operating. Scientific data related to environmental effects of fish farming are eutrophication, organic and non-organic pollutants, dissolved oxygen reduction, which are difficult to be traced directly from satellite data, but usually are estimated by relating these parameters with ocean water. Main objective of this study was the processing of data from the satellite Sentinel-2A, for extracting and studying the spectral signatures for the pixels correspond to the sampling points, the correlation of satellite measurements with nutrients retrieved by the in situ measurements and the investigation of the possibility to develop models for quantifying the nutrients directly from the satellite data. The results showed that there is an increase of the reflectance in near infrared region for most of the parameters studied, which are correlated at the infrared and the coefficients of determination vary with the parameters and depths. In conclusion, by using Sentinel-2A satellite imagery, the development of a model for quantifying nutrients could lead to an operational monitoring of the fish farming environment.

Keywords: Aquaculture, Environmental Impact, Nutritional Salts, Copernicus Program, Sentinel-2 Satellite, QGIS Software.